

CROISSANCE ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENT : EXISTE-T-IL UNE CONVERGENCE DES ÉMISSIONS DE CO₂ A L'ÉCHELLE PLANÉTAIRE ?

Par

Minougou Joël Wendmanegda

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Madame Jie He

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Septembre 2017

SOMMAIRE

Mots clés : croissance économique, bêta-convergence absolue, bêta convergence conditionnelle, émissions par tête de CO₂, rendements d'échelle décroissants

L'objectif de cet essai est de mesurer la convergence des émissions par tête de dioxyde de carbone pour 151 pays du monde sur la période 1960-2014. En effet, la relation entre la croissance économique et la préservation de l'environnement est controversée et continue de diviser les décideurs publics et le monde scientifique. La courbe environnementale de Kuznets, s'inscrivant du côté de ceux qui soutiennent l'idée d'une conciliation possible entre la croissance économique et l'environnement, prédit une baisse des émissions de dioxyde de carbone dans le long terme. Malgré cette baisse des émissions, la croissance économique devrait continuer. Cependant, ce concept a été fortement remis en cause au point où certains auteurs l'ont qualifié de fausse bonne nouvelle. Par la suite, d'autres auteurs ont suggéré la mesure de la convergence des émissions de dioxyde de carbone, puisque selon eux elle expliquerait la courbe de Kuznets environnementale.

Ainsi les données de la banque mondiale ont été utilisées pour vérifier l'hypothèse de la convergence absolue et conditionnelle de l'échantillon global. Par ailleurs, sept sous échantillons ont été créés pour l'approche des clubs de convergence. Les résultats par la méthode d'estimation des moindres carrés ordinaires sur les données en coupe transversale révèlent une présence de convergence pour l'échantillon global et les sept clubs. Par contre, la méthode d'estimation des moments généralisés sur les données en panel fait ressortir une absence de convergence à la fois pour l'échantillon global et pour les clubs. Ainsi ce travail a permis de souligner que la mesure de la convergence est sensible à la méthode et au type de données utilisés. Ceci est un signal fort pour les orientations des politiques environnementales internationales.

Afin d'apporter des éléments de réponses à la problématique des changements climatiques imputables en grande partie aux émissions de dioxyde de carbone, des recommandations ont été faites à la lumière des résultats de ce travail. Il s'agit de l'amélioration du système de comptabilisation des émissions, la création d'un fonds de recherche pour le financement des études de convergence et le renforcement du cadre juridique en matière d'environnement dans les pays en développement. Aussi, les questions de la croissance économique et de la préservation de l'environnement devraient être simultanément abordées dans les négociations internationales sur le climat.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d’abord à remercier madame Jie He pour le temps qu’elle a consacré à l’encadrement de cet essai. Elle a toujours été disponible pour répondre à mes questions et me prodiguer des conseils pour la bonne marche de ce travail.

Un grand merci au personnel de la direction du CUFE pour l’accompagnement tant administratif qu’académique.

Je remercie aussi très sincèrement ma famille, particulièrement mon épouse Dorcas Zabre qui m’a aussi beaucoup soutenue dans la réalisation de ce travail.

Je remercie le seigneur Jésus-Christ pour la santé qu’il m’a donnée durant la rédaction de cet essai. Je lui rends infiniment grâce à pour ce qu’il n’a cessé d’être mon rocher et ma forteresse.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. CROISSANCE ÉCONOMIQUE INCOMPATIBLE AVEC LA PRÉSERVATION DE L'ENVIRONNEMENT.....	4
1.1. Les physiocrates	4
1.2 Le principe de la population de Malthus (1798)	5
1.3 L'état stationnaire chez David Ricardo.....	6
1.4 La révolution industrielle et la rupture avec les économistes classiques	7
1.5 Le club de Rome « Halte à la croissance »	7
1.6 Loi de l'entropie et théorie de la décroissance	10
2. CROISSANCE ÉCONOMIQUE COMPATIBLE AVEC LA PRÉSERVATION DE L'ENVIRONNEMENT.....	12
2.1 La pensée néoclassique et ses hypothèses	12
2.2 De la relation de Kuznets à la CKE	14
2.2.1 Fondements de la relation de Kuznets.....	14
2.2.2 Contexte de la transposition de la relation de Kuznets en environnement	16
2.2.3 La courbe de Kuznets environnementale (CKE)	17
2.2.4 Vérification empirique de la CKE.....	18
2.2.5 Critiques de la CKE.....	19
2.3 Concept de découplage.....	21
2.3.1 Découplage relatif	22
2.3.2 Découplage absolu	23
3. PROBLÉMATIQUE	26
4. CONCEPT DE CONVERGENCE ET REVUE DE LA LITTÉRATURE	28
4.1. Origines du concept de la convergence : modèle de Solow (1956)	28
3.1.1 Fonction de production quelques hypothèses.....	28
3.1.2 Dynamique du modèle	30
4.2. Modèle vert de Solow et la convergence environnementale	34
4.2.1 Point de départ du modèle	34
4.2.2 Introduction de la pollution dans le modèle	35
4.2.4 Relation entre le modèle vert de Solow et la CKE.....	38
4.2.3 Convergence environnementale à partir du modèle vert de Solow	41
4.3 Les différents types de mesure de la convergence environnementale	43
4.3.1 La β -convergence absolue.....	43
4.3.2 La β -convergence conditionnelle	44
4.3.3 Les clubs de convergence	45
4.3.4 La sigma-convergence	45

4.3.5 La convergence stochastique	46
4.4 Revue de la littérature sur les études de convergence environnementale	46
5. MÉTHODOLOGIE ET ANALYSE	49
5.1 Données.....	49
5.2 Statistiques descriptives.....	50
5.3 Méthode d'estimation de l'équation de convergence.....	54
5.3.1 Méthode d'estimation MCO	54
5.3.2 Limites de la méthode d'estimation MCO.....	57
5.3.3 Méthode d'estimation GMM	57
5.4 Résultats et interprétation	59
5.4.1 Convergence absolue et conditionnelle en coupe transversale	59
5.4.2 Détection des clubs de convergence.....	61
5.4.2 Convergence conditionnelle en panel dynamique.....	66
6. DISCUSSIONS SUR LES RÉSULTATS	69
7. RECOMMANDATIONS.....	73
CONCLUSION	75
RÉFÉRENCES	78
BIBLIOGRAPHIE.....	84
ANNEXE 1 : TABLEAU DE DESCRIPTION DES VARIABLES (tiré de : Banque Mondiale, 2017).....	85
ANNEXE 2 : TABLEAU DE DESCRIPTION DES SOUS ECHANTILLONS	86
ANNEXE 3 : LISTE DES PAYS DE L'ECHANTILLON GLOBAL	87

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Prédictions des futurs possibles de l'humanité (Inspiré de :.....	9
Figure 2.1	Courbe de Kuznets : relation entre inégalités et croissance)	15
Figure 2.2	Courbe environnementale de Kuznets	18
Figure 2.3	Différentes formes de la relation croissance environnement	19
Figure 2.4	Exemple de découplage relatif	22
Figure 2.5	Exemple de découplage absolu)	23
Figure 4.1	État stationnaire modèle de croissance néoclassique	32
Figure 4.2	Relation modèle vert de Solow et CKE	39
Figure 5.1	Émissions par tête de CO ₂ au niveau mondial de 1960 à 2013	52
Figure 5.2	Évolution du taux d'épargne de 1960 à 2013	53
Figure 5.3	Évolution du taux de croissance de la population de 1960 à 2013	54
Figure 5.4	Nuage de points du taux de croissance des émissions par tête de CO ₂ en fonction leur niveau initial	55
Figure 5.5	Représentation graphique de la méthode d'estimation MCO	56
Tableau 5.1	Statistiques descriptives des émissions par tête de CO ₂ et des variables conditionnelles.	51
Tableau 5.2	Estimation MCO de l'équation de convergence absolue et conditionnelle	59
Tableau 5.3	Estimation MCO de l'équation de convergence des clubs AFRQUE, AMÉRIQUE LATINE ASIE et EUROPE.....	62
Tableau 5.4	Estimation MCO de l'équation de convergence des clubs CEDEAO, OCDE, et UE	65
Tableau 5.5	Estimation en système GMM de l'équation de convergence en panel dynamique.....	67
Tableau 6.1	Processus d'obtention de l'estimation en système GMM de l'équation de convergence en panel dynamique	70

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AEE	Agence européenne pour l'environnement
ALENA	Accord de libre-échange nord-américain
AR (2)	Autocorrélation d'ordre deux
CEDEAO	Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest
CKE	Courbe de Kuznets environnementale
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GMM	Méthode des moments généralisés
MCO	Moindres carrés ordinaires
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
PIB	Produit intérieur brut
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
UE	Union européenne
UEMOA	Union Économique et Monétaire Ouest Africaine
WDI	<i>World Development Indicators</i>

INTRODUCTION

L'histoire de l'humanité révèle qu'au fil des ans, la majorité des pays ont enregistré une augmentation progressive du niveau de vie leurs populations ainsi qu'une amélioration de leurs conditions de vie. Cette situation est souvent perçue comme une conséquence de la croissance économique. C'est pour cette raison que Simon Kuznets dans son discours de réception du prix Nobel d'économie en 1971 définissait la croissance économique d'un pays comme «sa capacité permanente d'offrir à sa population en augmentation, une quantité accrue de biens et services par habitant ». Ainsi, dans la quête permanente du bonheur des populations, l'intensification de la production est devenue un impératif pour assurer une croissance économique conséquente. Cette dernière est pourtant la source potentielle des pressions de l'homme sur l'environnement avec des répercussions qui constituent un lourd fardeau difficile à supporter sur le plan international.

En effet, avant la révolution industrielle certains penseurs en l'occurrence les économistes classiques, avaient déjà souligné qu'il était difficilement envisageable de concilier la croissance économique avec la préservation de l'environnement. La révolution industrielle a marqué la rupture avec la pensée classique, conduisant ainsi à une croissance économique en marge des questions environnementales. Cette période connue sous le nom des trente glorieuses (1945-1975) s'est caractérisée par une augmentation plus que jamais de la production industrielle avec des dommages graves causés à l'environnement. Ainsi, une prise de conscience environnementale est intervenue dans les années 1970 avec la création du club de Rome.

Il convient de souligner que le dioxyde de carbone considéré comme le principal gaz à effet de serre d'origine anthropique figure parmi les grandes préoccupations environnementales. La preuve en est que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) affirme dans son cinquième rapport que « les émissions de CO₂ par combustion de combustibles fossiles et par les procédés industriels ont contribué pour environ 78 % de l'augmentation des émissions totales de gaz à effet de serre de 1970 à 2010 ». Les facteurs qui expliquent cette situation sont essentiellement la croissance économique et la croissance démographique. Cette dernière semble avoir moins d'effet puisque selon le GIEC, l'effet de la croissance démographique sur les émissions de CO₂ entre la période 2000-2010 est resté identique à celui des 30 dernières années alors que celui de la croissance économique a fortement augmenté. Il est donc important de noter qu'une meilleure compréhension du comportement des émissions de CO₂ passe nécessairement par une maîtrise de la relation entre la croissance économique et l'environnement.

Afin de prédire une possibilité de conciliation entre la croissance économique et l'environnement, Grossman et Krueger (1991) ont emprunté à Kuznets (1955) un concept qui sera appliqué dans la sphère environnementale. Il s'agit de la courbe de Kuznets Environnementale (CKE), selon laquelle les émissions de CO₂ dans le long terme devraient se stabiliser et baisser graduellement par la suite. Ce concept est venu alimenter le débat politique international sur les émissions polluantes et a attiré l'attention du monde de la recherche. C'est ainsi que certains auteurs sont restés septiques vis-à-vis de la véracité des prédictions de ce concept. Pourtant, si ce concept était vérifié, les prévisions futures sur le climat allaient être moins alarmantes. En plus, les pays industrialisés pourraient avoir un regain d'intérêt pour les accords et traités internationaux comme le protocole de Kyoto. En effet, plusieurs pays ont quitté ses accords (Kinda, 2013).

La CKE a été critiquée par plusieurs auteurs, remettant ainsi en cause ses prédictions quant à la stabilisation et la réduction des émissions de CO₂ dans le long terme. Afin d'apporter des éléments de réponses à ses divergences, d'autres auteurs ont emprunté le concept de convergence à la théorie économique néoclassique à partir des années 2000. Selon ce concept, tous les pays devraient converger vers l'état stationnaire des émissions par tête de CO₂, correspondant à une situation où le taux de croissance de celles-ci est nul. En fait, Brock et Taylor en 2004 ont démontré à travers le modèle vert de Solow qui est une extension du modèle néoclassique de Solow et Swan (1956) que la convergence des émissions par tête de CO₂ permet d'expliquer l'EKC. La pertinence de ce concept réside dans le fait qu'elle permet de dépasser les insuffisances de cette dernière.

L'objectif premier de ce travail est de vérifier l'hypothèse de la convergence des émissions de CO₂ à l'échelle planétaire. L'atteinte de cet objectif est assujettie à la réalisation de six objectifs spécifiques. Le premier consiste à collecter les données sur les émissions par tête de CO₂, le taux d'épargne, le taux de croissance annuel de la population, et le taux d'ouverture au commerce international de 151 pays du monde sur la période 1960-2014. L'élaboration d'une base de données à partir des données collectées entre en ligne de compte dans ce premier objectif spécifique. Le deuxième consiste à faire l'état des lieux sur les courants de pensées et concepts qui traitent de la relation entre la croissance économique et l'environnement. Quant au troisième objectif spécifique, il s'agira de présenter le modèle économique sur lequel le concept de la convergence environnementale. Finalement, le quatrième se repose sur l'analyse des données, l'interprétation des résultats et la formulation de recommandations.

En ce qui concerne les sources utilisées dans ce travail, la préférence est accordée aux articles de revues scientifiques de premier rang avec comité de lecture. Aussi, une grille de sélection se rattachant à la fiabilité et la crédibilité a été constituée pour la sélection des publications gouvernementales, les thèses, les mémoires et les documents internet.

Le présent essai est divisé en sept parties. La première et la deuxième traitent de la relation entre la croissance économique et l'environnement. La troisième présente la problématique qui suscite la nécessité d'étudier la convergence des émissions de CO₂. La quatrième se rapporte à la présentation du concept de convergence et de la revue de littérature sur les études de convergence environnementales. En ce qui concerne la cinquième partie, elle se repose sur la méthodologie de vérification de l'hypothèse de la convergence des émissions de CO₂, l'analyse des données ainsi que l'interprétation des résultats. La sixième se repose sur une discussion se rapportant aux résultats de l'analyse. Finalement la septième partie est consacrée à la formulation de recommandations.

1. CROISSANCE ÉCONOMIQUE INCOMPATIBLE AVEC LA PRÉSERVATION DE L'ENVIRONNEMENT

Les rudiments des réflexions en faveur d'une incompatibilité entre la croissance économique et l'environnement proviennent des physiocrates. À la suite de ces derniers, Malthus (1798) avec son principe de la population viendra alimenter le débat par une mise en évidence des enjeux de la croissance démographique. De même, Ricardo (1817) tentera de recadrer la réflexion à travers sa théorie de l'état stationnaire. Cependant, la révolution industrielle s'est accompagnée d'une rupture avec les réflexions des économistes classiques en faveur de la pensée néoclassique. Il a fallu attendre la prise de conscience environnementale des années 1970, pour donner une nouvelle dynamique à ce débat. C'est ainsi que le club de Rome a été créé avec une vague de réflexions sur la théorie de la décroissance.

1.1. Les physiocrates

L'école des physiocrates fondée au milieu du XVIII^e siècle a mené les premières réflexions sur le lien entre la croissance économique et l'environnement. La signification étymologique du mot Physiocratie est « *Gouvernement de la nature* » caractérisant ainsi l'attachement de cette école aux phénomènes naturels (Belpaire, 2013).

Le chef de file de cette école a été François Quesnay dont les réflexions étaient basées essentiellement sur le rôle de la terre dans la création de la richesse. Selon les physiocrates, la richesse nationale provient exclusivement de l'agriculture. Ainsi les activités industrielles ou de commerce considérées comme stériles, ne font que transformer des biens et par conséquent ne peuvent créer de la richesse dans une économie (Hamaide et autres 2012).

Dans sa publication intitulée *tableau économique*, Quesnay (1758) met en évidence l'existence d'un ordre naturel assimilable au fonctionnement de l'organisme vivant et qui régit la reproduction de la richesse. Pour rendre compte du rôle principal joué par la terre dans la production de la richesse, l'auteur élabore un tableau qui relie la terre à l'ensemble de l'économie. Dans cet ouvrage l'auteur met en évidence trois classes dans le fonctionnement de l'économie pour expliquer le rôle joué par la terre dans la création de la richesse. Il s'agit de la classe des propriétaires à qui appartiennent les terres, la classe productive qui cultive la terre, et la classe stérile qui transforme le produit de la terre.

Même si les physiocrates ne se sont pas prononcés clairement sur l'incompatibilité entre la croissance économique et l'environnement, le rôle central que la terre occupe dans leurs réflexions témoigne de

l'impossibilité d'une croissance économique en marge de certaines composantes de l'environnement. C'est pour cette raison que Quesnay (1758) fait remarquer l'intérêt qui s'attache à l'entretien de la terre pour une pérennisation de la production.

1.2 Le principe de la population de Malthus (1798)

À la suite des physiocrates, Malthus (1798) s'est aussi intéressé à la relation entre la croissance économique et l'environnement en mettant l'accent sur la croissance démographique et la richesse disponible.

Malthus a constaté qu'en Angleterre entre les années 1700 et 1840, la population est passée de 6 millions à 16 millions d'habitants. Il prédit que cette forte explosion démographique pourrait créer à long terme un grand écart entre les moyens de subsistance disponibles et les besoins de la population en nourriture. C'est ainsi qu'il a pu établir une comparaison entre la progression de la pollution et des moyens de subsistance. Il fait ainsi remarquer que la population croîtra selon la progression géométrique 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256. Cependant, les moyens de subsistance croîtront selon la progression arithmétique 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Ainsi, une prédiction conjointe de la population et des moyens de subsistance sur deux siècles donnera le rapport 256 sur 9 et sur trois siècles le rapport 4096 sur 13 (Malthus ,1798)

Cette situation selon Malthus (1798), conduirait inévitablement à des crises alimentaires, des famines et des guerres si les décideurs ne mettent pas en place des politiques pour freiner la croissance de la population. On ne devrait donc pas s'attendre à ce que la production agricole comme la seule force de l'économie puisse répondre aux besoins d'une population de plus en plus croissante. La rareté des moyens de subsistance constitue donc une limite naturelle à la croissance démographique. La seule condition dans laquelle la population existante pourrait trouver des aliments en quantité suffisante exigerait l'existence d'une loi supérieure qui fera obstacle à la croissance démographique. Pour ce faire, il met en évidence deux types d'obstacles : les obstacles destructifs et les obstacles préventifs.

Les obstacles destructifs constituent les phénomènes qui tendent à freiner la croissance démographique par la réduction de l'espérance de vie émanant de certains vices ou malheurs. Il s'agit entre autres des maladies, des épidémies, des guerres, de la famine, des métiers malsains, les travaux pénibles, de l'inclémence des saisons de l'extrême pauvreté, de la malnutrition des enfants, et de l'insalubrité des grandes villes (Malthus ,1798). En ce qui concerne les obstacles préventifs, ils regroupent les actions

préventives à l'accroissement de la population issues de la contrainte morale comme l'abstention au mariage ou la chasteté.

Selon Verchère (2011), Malthus fait partie du « camp pessimiste, allant des plus résignés et fatalistes aux plus simples incrédules, convaincus dans l'ensemble que l'humanité sera tôt ou tard rattrapée par la nature, sauf si, et dans le meilleur des cas, elle accepte des changements radicaux ». En d'autres termes, sa vision remet en cause une conciliation entre la croissance économique et la préservation de l'environnement en présence d'une explosion démographique continue.

1.3 L'état stationnaire chez David Ricardo

Inspiré par les propos de Malthus, Ricardo (1817) s'est aussi penché sur le lien entre la croissance démographique et la production agricole. Il a développé dans son ouvrage intitulé *« principe de l'économie politique et de l'impôt »* la théorie de la rente foncière. Il définit la rente comme *« la portion du produit de la terre que l'on paie au propriétaire pour avoir le droit d'exploiter les facultés productives et impérissables du sol »*. Il fait remarquer qu'une économie est essentiellement composée de trois composantes qui sont à la base de la création de la richesse, à savoir le travail, le capital et la terre. La rémunération de ses composantes est respectivement le salaire, le profit et la rente.

Par ailleurs, Il ressort de sa théorie que la croissance démographique se traduit par une hausse de la demande et des prix. Pour faire face à cette demande, il faudra augmenter la production, ainsi les capitalistes auront tendance à exploiter des terres de moins en moins fertiles conformément à la loi des rendements décroissants. Cette dernière stipule qu'au fur et à mesure que la production augmente, elle atteindra un niveau pour lequel une augmentation des facteurs de production est associée à une augmentation moins proportionnelle de la production. De plus. L'augmentation des surfaces cultivées par l'acquisition croissante de nouvelles terres de moins en moins fertiles se traduit par une hausse de la rente. Le besoin croissant de main-d'œuvre oblige les capitalistes à augmenter la rémunération du travail. Ainsi, la hausse de la rente combinée avec la hausse des salaires réduit considérablement les profits. Ces derniers engendrent une baisse des investissements, conduisant l'économie à une situation sans croissance appelée « *état stationnaire* ». La rareté des ressources imputables à la croissance démographique conduit inévitablement à cette situation (Ricardo, 1817).

1..4 La révolution industrielle et la rupture avec les économistes classiques

Les physiocrates et les économistes classiques comme Malthus et Ricardo avaient une vision pessimiste de la croissance économique qui s'explique par la rareté des ressources. L'avènement de la révolution industrielle en Angleterre avec la naissance du courant néoclassique donnera un nouveau souffle à la croissance économique. La théorie qui a inspiré cette nouvelle vision est la ``*substituabilité des facteurs*``. Elle a permis de considérer la production comme une combinaison de facteurs substituables que sont la terre, le travail et le capital. Il est important de souligner que les physiocrates tout comme les classiques qui les ont précédés considéraient la terre comme une contrainte à la croissance, car elle ne pouvait à elle seule fournir à une population qui ne cesse de croître les moyens de subsistance nécessaires. Cependant, sous l'hypothèse de la substituabilité des facteurs cette contrainte n'existe plus puisqu'il est maintenant possible de substituer la terre au capital ou au travail. Ainsi les préoccupations relatives à la rareté des ressources ne sont plus d'actualité (Camara, 2015).

Bien que cette vision soit dominante à cette période, Jevons (1865) a pris du recul dans un de ses ouvrages où il s'est questionné sur l'existence d'une croissance économique à long terme malgré l'hypothèse de la substituabilité des facteurs. Son point de départ a été un constat connu couramment sous le nom de ``*paradoxe de Jevons*``. En effet il a remarqué qu'en Angleterre malgré l'innovation technologique avec l'invention de la machine à vapeur, la consommation de charbon était toujours croissante. C'est ainsi qu'il a prédit l'épuisement des ressources à long terme et le déclin de l'économie britannique. À la suite de Jevons, plusieurs autres économistes ont essayé vainement de faire remarquer qu'il était important de tenir compte de l'épuisement des ressources dans la théorie économique. Il s'agit par exemple de Hotelling (1931) qui s'est penché sur l'exploitation des ressources épuisables et Pigou (1920) qui a fait remarquer l'importance de l'internalisation des externalités. Il a fallu attendre les années 1970 avec les deux chocs pétroliers et le constat de la raréfaction des ressources pour que les préoccupations environnementales redeviennent un sujet d'actualité.

1.5 Le club de Rome « *Halte à la croissance* »

Le Club de Rome est une organisation internationale non gouvernementale multidisciplinaire fondée en 1968 et regroupant des scientifiques, des chercheurs, des professeurs, des gens d'affaires, ainsi que des femmes et des hommes d'État de plusieurs continents. Sa mission consiste essentiellement à réfléchir et à apporter des éléments de réponses aux problématiques entre autres environnementales, politiques, sociales, culturelles, technologiques à l'échelle mondiale dans une optique de long terme (MDDELCC, 2017)

Cette organisation a été créée dans un contexte de prise de conscience environnementale. En effet, la période d'après-guerre (1945-1970) avec la révolution industrielle a été marquée par une forte explosion démographique et une forte croissance économique. Ces deux phénomènes ont eu de graves répercussions sur l'environnement et ont conduit au regain d'intérêt pour les questions environnementales avec la création du Club de Rome.

Afin de mieux cerner les préoccupations environnementales de cette époque, avec le constat de la raréfaction des ressources imputable à la croissance économique et démographique, le Club de Rome a commandé une étude à une équipe de chercheurs du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Le rapport de cette étude intitulée *Limits of Growth* ou « *Halte à la croissance* » dans sa version française a été le nouveau point de départ dans le monde académique et politique pour les réflexions sur la conciliation entre la croissance économique et la préservation de l'environnement.

Ce rapport est basé sur un constat de l'évolution des statistiques démographiques. L'année 1650 ayant été prise comme le point de référence, les auteurs font remarquer que la population mondiale est passée de 500 millions à un milliard d'habitants en 170ans, ensuite d'un à deux milliards en 105ans. Dans cette même tendance, il a fallu juste 55ans pour que la population mondiale passe de deux à quatre milliards d'habitants en 1980. À partir de ces constats, il a été question de prédire les futurs possibles de l'humanité dans un contexte de raréfaction progressive des ressources. L'hypothèse de départ étant le statu quo des tendances actuelles, les chercheurs du MIT ont construit 12 scénarios en intégrant d'autres hypothèses comme le progrès technique, la capacité d'absorption naturelle de la pollution et les politiques mises en place pour influencer le comportement de l'être humain sur l'environnement. Ainsi, un modèle dynamique sur ordinateur a été créé afin d'observer les interactions de cinq facteurs que sont la population, les ressources naturelles, la pollution, les ressources alimentaires par tête d'habitant, la production industrielle par tête d'habitant. Ces simulations ont été faites sur deux siècles, précisément sur la période 1900 à 2100. La figure1.1 rend compte des prédictions futures de l'humanité issues des simulations (Mongneau, 2012)

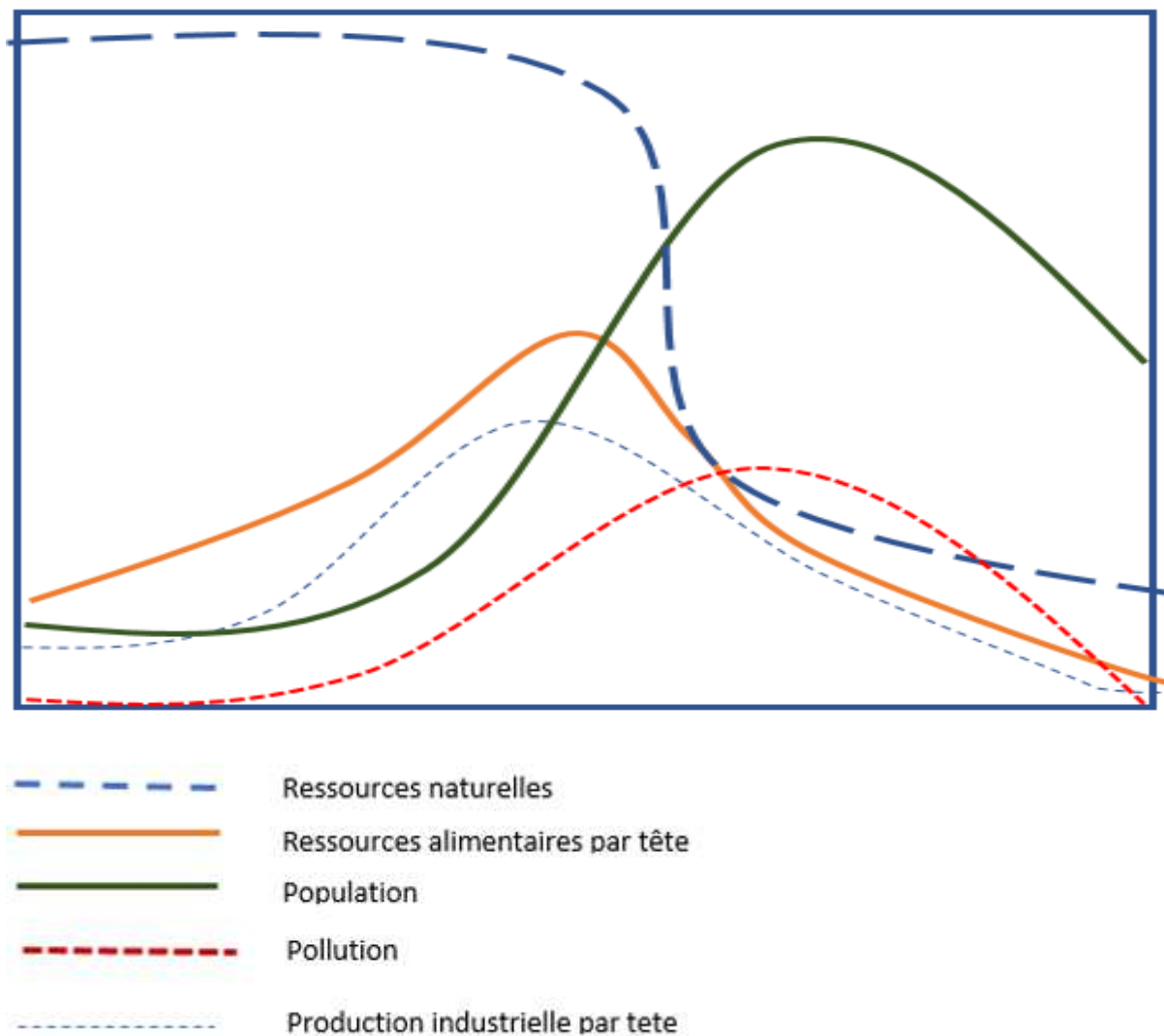


Figure 1.1 Prédictions des futurs possibles de l'humanité (Inspiré de : Mongneau, 2012, p.89)

Il ressort du graphique que sous l'hypothèse du maintien des tendances qui prévalaient pendant la période de la production de ce rapport, les ressources alimentaires, la population et la production industrielle devraient continuer à croître jusqu'à un certain niveau avant de connaître une phase de décroissance. La décroissance des ressources alimentaires avant l'année 2000 s'explique par l'urbanisation croissante qui est une conséquence directe de l'explosion démographique. En effet selon les auteurs, l'urbanisation accélérée réduit considérablement les surfaces cultivables, augmentant ainsi les coûts de production alimentaire d'où la réduction des ressources alimentaires. Les ressources naturelles non renouvelables devraient progressivement décroître au fur et à mesure qu'elles sont exploitées dans la production industrielle. Ainsi l'intensification de la production industrielle réduira considérablement le stock de

ressources naturelles disponibles. La courbe des ressources naturelles décroît donc jusqu'à un certain niveau où il se présente une pénurie des matières premières utilisées dans la production industrielle, expliquant la décroissance de la courbe de celle-ci. Même si le temps de réponse des courbes de la population et de la pollution est relativement plus long, elles finissent par décroître. En fait, la réduction des ressources alimentaires et de la production industrielle conduit à une augmentation du taux de mortalité qui met fin à l'explosion démographique. Quant à la courbe de la pollution, sa décroissance s'explique par le ralentissement progressif de la production industrielle (Mongneau, 2012).

Ce rapport conclut, quels que soient les scénarios et les hypothèses choisis, les résultats présentant les tendances du comportement de l'écosystème mondial sont similaires. Ainsi les futurs de l'humanité devraient être marqués par un effondrement, précédé d'une croissance exponentielle de la population, et une exploitation non contrôlée des ressources naturelles à des fins d'investissements.

Bien que ce rapport ait connu un plein succès sur le plan médiatique avec une vente de plus de 12 millions d'exemplaires et une traduction en 37 langues, plusieurs auteurs ont relevé ses limites. Ces dernières concernaient essentiellement les hypothèses utilisées dans les scénarios, la méthodologie et la conclusion du rapport (Camara, 2015).

En ce qui concerne les hypothèses, Beckerman (1974) dans son ouvrage intitulé *In Defence of Economic Growth* a fait remarquer que les ressources non renouvelables ont été sous-estimées. De même, l'hypothèse des rendements décroissants de la production alimentaire a été remise en cause par Sauvy (1973). Sa critique est basée sur un constat selon lequel, de 1880 à 1910 la population allemande s'est accrue tandis que celle de la France a stagné. Ainsi les rendements de la production agricole de l'Allemagne devraient en principe être moins importants par rapport à ceux de la France sous l'hypothèse des rendements décroissants. Cependant, l'auteur remarque par exemple que les rendements à l'hectare de la production du blé ont connu une hausse de 21 % pour la France contre 63 % pour l'Allemagne malgré l'augmentation de sa population.

1.6 Loi de l'entropie et théorie de la décroissance

Ces théories sont basées sur la deuxième loi de la thermodynamique connue sous le nom de loi d'entropie. En effet, cette loi stipule que dans un système clos l'énergie transformable en travail ne peut que diminuer. Georgescu-Roegen (1979) est un grand précurseur de cette théorie puisque dans son ouvrage intitulé « *la décroissance* » a été un grand apport dans la compréhension de cette théorie. Il remet ainsi en cause

l'idée d'un développement économique susceptible de se poursuivre infiniment dans un monde où les ressources naturelles sont limitées. Il constate que depuis la révolution industrielle l'exploitation de plus en plus croissante des ressources naturelles a conduit l'humanité dans une situation où la biosphère a atteint ses limites et risque d'être incapable de répondre aux besoins des générations futures. C'est dans ce sens qu'il a remis sérieusement en cause le capitalisme par son incapacité de prendre en compte les besoins de la génération actuelle moins nantie et ceux des générations futures.

2. CROISSANCE ÉCONOMIQUE COMPATIBLE AVEC LA PRÉSERVATION DE L'ENVIRONNEMENT

Les réflexions sur une possibilité de conciliation entre les croissances économiques ont été engendrées par l'école néoclassique. Cette dernière a développé des théories pour remettre en cause la vision classique de l'environnement et de la croissance économique. En s'appuyant sur les fondements de cette école plusieurs, les concepts comme la relation environnementale de Kuznets et le découplage ont vu le jour.

2.1 La pensée néoclassique et ses hypothèses

La pensée néoclassique est la plus dominante de la théorie économique avec une vision sur l'environnement qui se démarque de celle des classiques. Ces derniers avaient évoqué clairement leurs préoccupations relatives à l'épuisement progressif des ressources naturelles, constituant ainsi une barrière à la croissance économique. Cependant selon les économistes néoclassiques l'existence d'un bien est rattachée à la satisfaction qu'il est susceptible de procurer à la population. Ainsi la consistance matérielle du bien n'est pas la préoccupation majeure comme le pensent les classiques. L'environnement est ainsi perçu comme un ensemble de biens qui rendent des services à la population et qui doivent être intégrés dans la fonction d'utilité des consommateurs tout comme dans la fonction de production des producteurs. La problématique environnementale est solutionnée par la recherche de voies et moyens pour allouer les ressources environnementales aux agents économiques en fonction de leurs préférences. C'est ainsi que pour les néoclassiques les mécanismes d'ajustement du marché devraient conduire à une allocation optimale des biens environnementaux et à une gestion optimale de l'environnement (Kestemont, 2010).

Lorsque le marché est défaillant, l'allocation des ressources environnementales n'est pas optimale, conduisant à une gestion inadéquate de l'environnement. C'est à ce problème que Pigou (1920) va s'attaquer dans ces réflexions sur la théorie des externalités. Ces dernières se réfèrent aux effets de l'action d'une firme ou d'un individu sur d'autres firmes ou individus lorsque ces effets n'ont pas été pris en compte par l'auteur de l'action. En d'autres termes, en présence d'externalités, il n'existe pas de mécanisme à même de compenser financièrement le bénéfice ou les dommages associés à ces effets. Les externalités positives se réfèrent à une situation où les effets sur la firme ou sur l'individu extérieur au marché sont positifs. Dans la même situation, on parlera d'externalités négatives lorsque les effets sont négatifs. C'est le cas par exemple de la pollution émise par les activités d'une firme qui génèrent des nuisances pour d'autres firmes ou des individus qui ne sont pourtant pas impliqués dans les activités de la

firme. Ces nuisances constituent un coût social pour la collectivité qui n'est pas intégré dans la décision de production de la firme polluante. En effet, selon les néoclassiques le coût social désigne l'ensemble des coûts imposés par une activité à la collectivité. Une partie du coût social, appelé coût privé est compensé par la firme par l'achat des matières premières et la rémunération de la main d'œuvre. L'externalité n'est que l'écart entre le coût social et le coût privé. C'est cet écart, lorsqu'il n'est pas compensé, engendra la défaillance du marché puisque le prix fixé ne tient pas compte de tous les coûts engagés dans la production du bien.

Pour venir à bout des défaillances du marché, les néoclassiques proposent d'internaliser les externalités. Il s'agit de façon précise de faire supporter par l'agent privé l'écart entre le coût social et le coût privé. Les néoclassiques prévoient deux possibilités pour cette internalisation à savoir l'instauration d'une taxe ou la régulation du marché.

L'instauration de la taxe émane des travaux de Pigou (1920) sur le principe du pollueur-payeur selon lequel une taxe doit être payée sur chaque unité de pollution émise et égale au coût marginal social de l'activité génératrice de la pollution. Ainsi le pollueur devrait faire un arbitrage entre le paiement de la taxe et l'utilisation de technologies moins polluantes.

La régulation du marché résulte des travaux de Coase (1960) sur les externalités. Selon lui l'existence des externalités s'explique par l'absence des droits de propriété sur les biens environnementaux. Ces droits s'ils sont créés, pourront être échangés sur un marché, engendrant ainsi une incitation financière à protéger l'environnement. C'est dans cette optique qu'il a préconisé la création d'un marché de droits à polluer. L'État ne joue pas un rôle majeur, car il devrait intervenir que dans la conception du dispositif à travers la fixation d'un plafond de pollution, la répartition des droits et l'autorisation des échanges. Contrairement à la taxe chez Pigou (1920) qui était administrée, ici c'est l'offre et la demande qui donnent le signal sur le prix optimal du droit à polluer. Ce principe incite les firmes à développer des technologies moins polluantes afin de pouvoir vendre leurs permis d'émissions sur le marché.

Les néoclassiques défendent l'idée d'une substituabilité parfaite du capital. Il existe alors deux types de capitaux, à savoir les capitaux naturels (ressources naturelles) et les capitaux artificiels, désignant les capitaux fabriqués (équipement de production). La rareté des ressources naturelles chez les classiques était associée au fait que la terre était le seul facteur de production et ne pouvait être substitué par un

autre facteur. Contrairement à la pensée des classiques, sous l'hypothèse de la substitution parfaite des facteurs de productions, l'innovation technologique permettra toujours d'utiliser le substitut du facteur de production qui devient de plus en plus rare. Ainsi le problème de rareté des ressources naturelles ne devrait plus se poser. Selon les néoclassiques, cette vision devrait permettre d'atteindre une équité intergénérationnelle connue couramment sous le nom de « *soutenabilité faible* ». En effet, le plus important pour eux est qu'il n'y ait pas une baisse du stock de capital global entre les générations (Kestemont, 2010).

C'est dans cette approche de l'équité intergénérationnelle que Hotelling (1931) dans son ouvrage `` *The Economics of exhaustible* `` s'est penché sur la question d'optimiser dans l'exploitation des ressources épuisables et non épuisables dans une optique d'équité intergénérationnelle. En ce qui concerne les ressources non renouvelables, ces travaux ont permis de conclure qu'un investissement rationnel devrait conduire à l'exploitation des ressources dont le stock est fixe et connu avec certitude. De même il fait remarquer que le prix des ressources non renouvelables doit dépendre du taux d'intérêt et du taux d'extraction. C'est ainsi qu'il a mis en place une règle connue sous le nom de « *règle d'hotelling* » qui stipule que la rente de rareté doit être intégrée dans le prix d'une ressource non renouvelable afin de maintenir l'équilibre de sorte qu'à l'extinction totale la demande soit nulle à cause du prix excessif de la ressource.

2.2 De la relation de Kuznets à la CKE

La relation de Kuznets n'a pas été établie à la base pour les questions environnementales. Il est donc nécessaire de passer en revue ses fondements et le contexte de sa transposition en environnement pour mieux cerner la CKE. En outre, cette dernière a été vérifiée empiriquement par plusieurs auteurs. Cependant, les avis sur sa fiabilité sont partagés dans le monde de la recherche, d'où la nécessité de discuter des critiques à l'encontre de ce concept.

2.2.1 Fondements de la relation de Kuznets

La relation de Kuznets tire ses racines des travaux de Kuznets (1955) dans son article intitulé *Economic Growth and Income Inequality* . Il s'est penché sur les caractéristiques et les causes de la distribution du revenu afin de comprendre l'évolution des inégalités dans la croissance économique d'un pays. En outre, il a tenté de faire ressortir les facteurs déterminants du niveau et de la tendance des inégalités. En ce qui concerne la tendance des inégalités, son étude a porté sur trois pays à savoir les États unis, l'Angleterre et

l'Allemagne. Cette étude a permis de faire remarquer l'existence d'une relation sous forme de U inversé entre le niveau du développement et les inégalités dans la distribution des revenus. En fait dans une première phase la croissance économique s'accompagne d'une croissance de plus en plus manifeste des inégalités. Ainsi, les écarts de revenus entre les riches et les pauvres augmentent au fur et à mesure que la croissance économique prend de l'ampleur. Dans la deuxième phase, les inégalités se stabilisent avant de se réduire dans une troisième phase alors que la croissance économique continue. La figure 2.1 établit la relation entre les inégalités et la croissance économique.

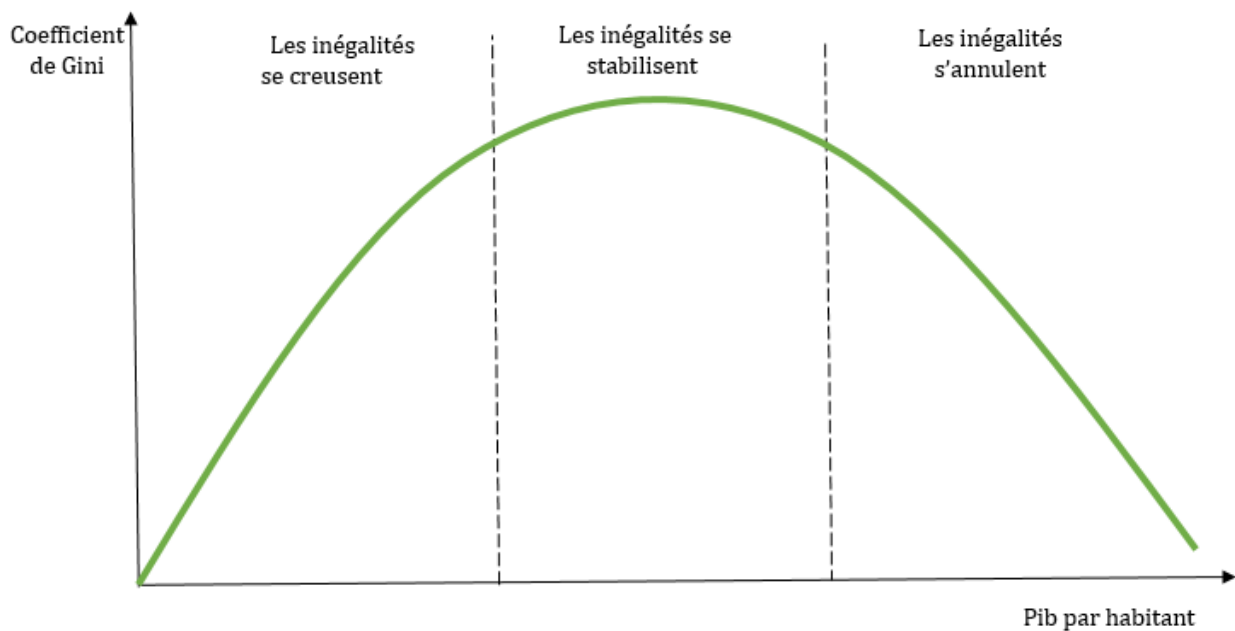


Figure 2.1 Courbe de Kuznets : relation entre inégalités et croissance (Inspiré de : Besançon, 2013, p.1)

L'auteur a essayé par la suite de donner une explication à cette tendance à long terme des inégalités dans la distribution des revenus. Il ressort que l'exode rural a joué un rôle essentiel dans la première phase marquée par une accentuation des inégalités. En effet, le début de la révolution industrielle a été marqué par le déplacement massif des paysans vers les grandes villes pour être ouvrier dans les fabriques. Le développement technologique et l'industrialisation croissante engendrés par la révolution industrielle ont ensuite contribué à corriger les écarts dans les inégalités des revenus, conduisant même à leur stabilisation. À cela s'ajoute la lutte des classes qui a permis de rehausser les revenus de la classe ouvrière avec une inversion de la tendance des inégalités. À la suite de Kuznets (1955), d'autres auteurs se sont penchés sur la question de la distribution des revenus. Tous ses travaux ont permis de mettre au point une

théorie qui soutient que la croissance économique est un facteur qui permet de réduire les inégalités de revenus.

2.2.2 Contexte de la transposition de la relation de Kuznets en environnement

De la prise de conscience environnementale jusqu'avant les années 1990, la plupart des débats sur le lien entre la croissance économique et l'environnement étaient essentiellement basés sur des réflexions théoriques. En effet, cette situation s'explique en partie par le fait que les données environnementales n'étaient pas assez disponibles pour réaliser des études empiriques. La nécessité d'élaborer des bases de données environnementales s'est dégagée pour une meilleure compréhension du lien entre la croissance économique et l'environnement. C'est ainsi que dans les années 1990, des bases de données comme celles de la banque mondiale et de l'OCDE ont été constituées.

La disponibilité des données environnementales a permis à certains auteurs de transposer la relation de Kuznets dans la sphère environnementale afin de mieux cerner la relation entre la croissance économique et l'environnement. Les premiers auteurs à vérifier cette hypothèse furent Grossman et Krueger (1991). Leur étude a porté sur les répercussions de l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA) sur l'environnement. En effet cette étude s'inscrivait dans un contexte où les environnementalistes avaient soulevé des inquiétudes sur les conséquences de cet accord sur l'environnement. Ces doutes étaient basés d'une part sur le fait que l'expansion du marché nord-américain allait s'accompagner d'une intensification des activités économiques avec une augmentation considérable des émissions polluantes. D'autre part, certaines inquiétudes se rapportaient au caractère non contraignant de la réglementation environnementale au Mexique. Cette dernière était susceptible d'engendrer une vague de délocalisation des firmes américaines et canadiennes vers le Mexique pour profiter des avantages en matière de pollution. En plus, les environnementalistes avaient peur que les autres pays membres de l'ALENA ne révisent leur réglementation environnementale pour la rendre moins contraignante afin de maintenir la compétitivité de leurs firmes (Grossman et Krueger, 1991).

Le seul moyen de rassurer les environnementalistes face à leurs inquiétudes était de démontrer que cet accord allait augmenter le taux de croissance économique dans ces pays, certes avec une augmentation des émissions de CO₂ en un premier temps, mais à long terme la croissance économique se poursuivra avec une baisse des émissions de CO₂. C'est ainsi que Grossman et Krueger (1991) ont transposé la relation

de Kuznets au domaine de l'environnement pour démontrer la situation souhaitée par les environmentalistes afin d'approuver l'ALENA.

2.2.3 La courbe de Kuznets environnementale (CKE)

La CKE décrit le lien entre la croissance économique et l'environnement en trois grandes phases. La première est celle du développement économique qui ne peut être rendu possible que par une activité économique intense, accompagnée d'émissions de CO₂ de plus en plus importantes avec l'industrialisation. En effet, la croissance économique se traduit par une augmentation du PIB par habitant caractérisée par une amélioration des conditions de vies de la population. Le pouvoir d'achat de la population ayant augmenté, les firmes devraient augmenter leur production pour répondre aux besoins de plus en plus grandissants et complexes des consommateurs. La deuxième phase correspond à une stabilisation des émissions de CO₂. En effet, les conditions de vies de la population s'étant améliorées, elle aspirera à un environnement sain et de qualité. C'est pourquoi elle sera plus soucieuse des pressions humaines sur l'environnement découlant de l'industrialisation. Les agents économiques modifieront donc leurs préférences en mettant l'environnement dans leur panier de consommation tout comme les autres biens. La troisième phase est une suite logique de la seconde. En effet, la stagnation des émissions est considérée comme un point de retournement à partir duquel il y'a une inversion de la tendance. C'est ainsi que cette phase est marquée par une décroissance des émissions de CO₂. C'est la combinaison de ces trois phases qui donne la forme du U inversé à la CKE comme le montre la figure suivante (Hamaide,2012)

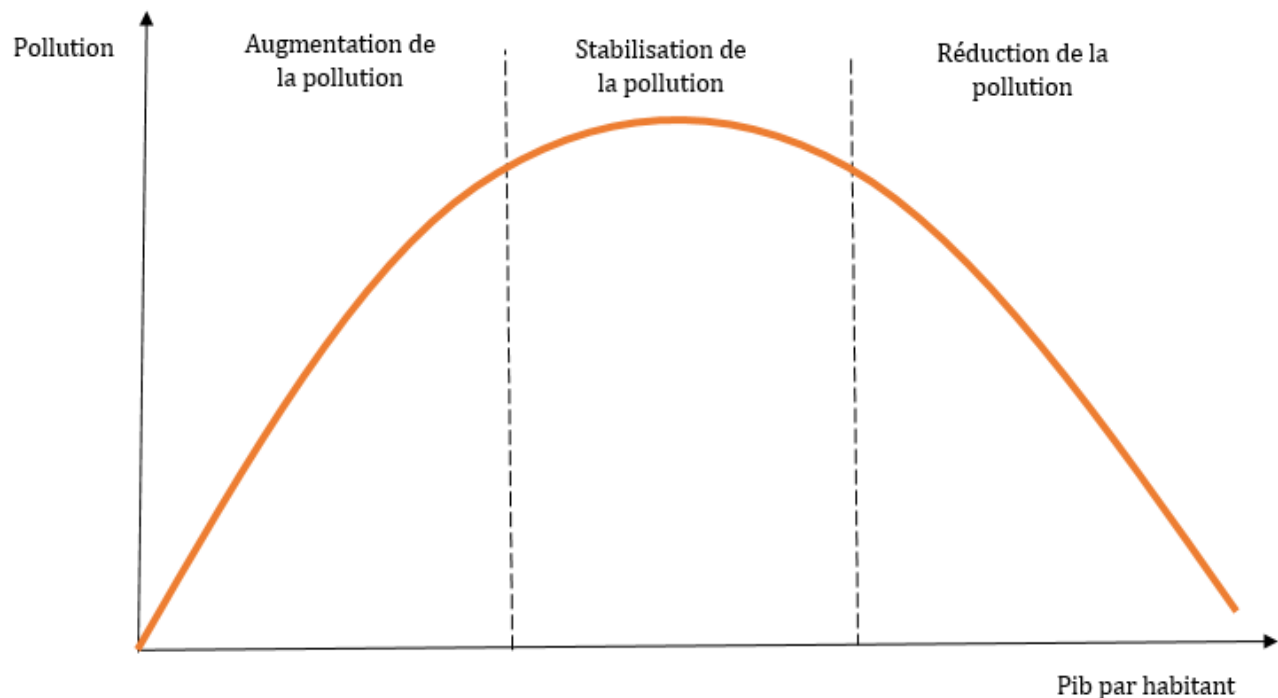


Figure 2.2 Courbe environnementale de Kuznets (Inspiré de : Meunié, 2004, p.3)

2.2.4 Vérification empirique de la CKE

Grossman et Krueger (1991) ont vérifié l'hypothèse de la CKE en utilisant une équation de la forme suivante :

$$y_{it} = \alpha_i + \beta_1 x_{it} + \beta_2 x_{it}^2 + \beta_3 x_{it}^3 + \beta_4 Z_{it} + \varepsilon_{it} \quad \text{Eq 2.1}$$

y_{it} est une variable environnementale, et pourrait être dans le cadre de ce travail les émissions par tête de CO₂ d'un pays i au temps t . La variable x_{it} représente le revenu par tête dans un pays ou une région i au temps t . Les variables x_{it}^2 et x_{it}^3 désignent respectivement le carré et le cube de la variable x_{it} . La variable Z_{it} représente une composante qui est susceptible de contribuer à la dégradation de l'environnement. α_i est une constante, $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ désignent respectivement les coefficients des variables $x_{it}, x_{it}^2, x_{it}^3$, et Z_{it} . La forme de la courbe reliant la croissance économique et l'environnement est obtenue par la valeur des coefficients β_1, β_2 et β_3 . Il est alors possible d'obtenir sept courbes dépendamment des résultats de l'estimation de cette équation :

- Si $\beta_1 = \beta_2 = 0$, il n'existe aucune relation entre la variable les variables x et y
- Si $\beta_1 < 0$ et $\beta_2 = \beta_3 = 0$ il se dégage une relation linéaire négative entre x et y
- Si $\beta_1 > 0$ et $\beta_2 = \beta_3 = 0$ il existe une relation linéaire positive entre x et y

- Si $\beta_1 < 0$ et $\beta_2 > 0$ il existe une relation sous forme de U entre x et y. C'est la relation inverse à celle de la CKE
- Si $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ et $\beta_3 > 0$ il existe une relation sous forme cubique polynomiale ou en forme de N entre x et y
- Si $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ et $\beta_3 < 0$ il existe une relation sous forme de N inversé entre x et y
- Si $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ et $\beta_3 = 0$ il se dégage une relation sous forme de U inversé entre x et y, correspondant au cas pour lequel l'hypothèse de la CKE est vérifiée.

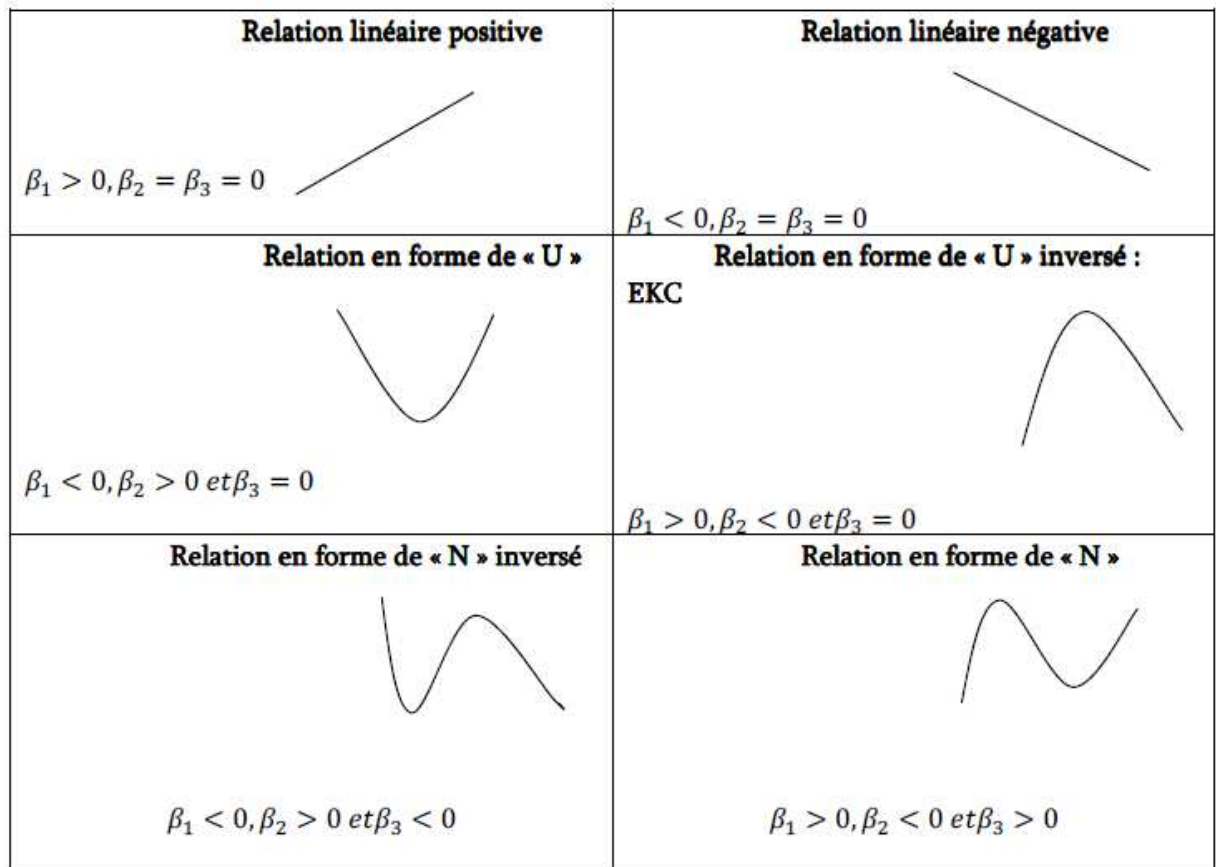


Figure 2.3 Différentes formes de la relation croissance environnement (Tiré de : Coulibaly, 2015, p.33)

2.2.5 Critiques de la CKE

Dans leur étude intitulée *Reexamining the Empirical Evidence for an Environmental Kuznets Curve*, Harbaug, Levinson, et Wilson (2002) ont revisité les résultats trouvés par Grossman et Krueger (1991) et qui avaient conduit à la conclusion sur l'existence de la CKE. Ces auteurs ont utilisé la même base de données que les premiers à laquelle ils ont apporté des modifications. Tout d'abord, l'ancienne base de

données comportait des données manquantes qui ont été complétées par ces auteurs. Ensuite la période d'étude a été allongée de dix années, soit précisément six années avant le début de l'ancienne période et quatre années après la fin. En outre, ils ont rajouté trois pays et 25 villes à la liste existante. Après la construction de cette nouvelle base, ces auteurs ont procédé aux analyses économétriques afin de comparer les résultats découlant de la nouvelle base de données avec l'ancienne. Il ressort des résultats de cette étude, une relation entre les émissions de polluants et les PIB par habitant qui diffère de l'ancienne étude. Ces résultats se traduisent graphiquement par une courbe sous forme de N inversé à la différence de la première qui était une courbe en forme de U inversé (Meunié, 2004). Au regard de ces résultats, il est possible de remettre en cause l'hypothèse de la CKE puisqu'elle est sensible aux données utilisées. Pourtant selon les arguments avancés par les auteurs en faveur de l'existence de la CKE, il devrait être possible de la vérifier indépendamment des données utilisées. Ceci est un premier questionnement face à la capacité de la CKE de bien représenter la relation entre la croissance économique et l'environnement.

Selon De Bruyn (1998), l'équation qui est utilisée pour la vérification de l'hypothèse de la CKE est de forme réduite, c'est-à-dire qu'elle n'intègre pas une composante qui permet d'élucider la cause exacte de la diminution de la pollution. En fait, la CKE ne permet pas de dire si la phase de la décroissance des émissions polluantes s'explique par l'impact de politiques environnementales ou par le changement des caractéristiques structurelles de l'économie. Cet auteur fait aussi remarquer que la CKE est une analyse à une échelle globale sans pour autant donner les tendances pour les pays pris individuellement. C'est ainsi qu'il a développé un modèle dynamique afin de pouvoir établir la relation entre la croissance économique et l'environnement pour chaque pays. L'auteur parvient à la conclusion que la croissance économique aurait un impact positif sur la pollution. En plus, la baisse de la pollution s'expliquerait par les changements des caractéristiques structurelles et technologiques des pays (Adam, 2001)

L'équation de la CKE fait face à un problème de causalité unidirectionnelle, remettant en cause la fiabilité des estimations. En effet, l'équation rend compte de l'effet de la croissance économique sur les émissions polluantes sans pour autant prendre en compte la situation inverse dans laquelle la pollution pourrait avoir un effet sur la croissance économique. En outre, selon cette équation, la pollution n'a un effet négatif que sur le bien-être. Pourtant, d'autres études démontrent que la pollution pourrait aussi avoir un effet négatif sur la production. C'est le cas par exemple des pays en développement dont les économies sont plus sensibles à une dégradation environnementale. En fait, pour certains de ces pays, l'exploitation des

produits forestiers constitue une grande part dans le PIB. Ainsi le secteur de l'exploitation forestière pourrait connaître un ralentissement considérable imputable à la dégradation environnementale. Il est alors évident que cette situation affecte négativement la santé économique de ces pays (Meunié, 2004).

Le choix du degré de l'équation constitue aussi un problème économétrique susceptible d'affecter les résultats. En effet, certaines études comme celles de (Grossman et Kruger (1991), McPherson et Nieswiadomy (2000), utilisent une équation de troisième degré ou cubique pour le revenu par habitant qui est une variable explicative. Cependant, d'autres études comme celles de Selden et Song (1994), Holtz-Eakin et Selden (1995) utilisent une équation de forme quadratique ou de deuxième degré. Les résultats de ces études sont sensibles au choix de la forme fonctionnelle de l'équation. En outre, les différents choix de forme fonctionnelle ne sont pas justifiés par des arguments solides. Il est alors difficile de dire avec précision ce qui motive un auteur à choisir une telle forme fonctionnelle au lieu d'une autre. Il est aussi possible de perdre de l'information à travers les choix qui sont opérés pour la forme de l'équation. En fait, pour une équation de troisième degré par exemple la significativité du coefficient du revenu par habitant au cube signale la présence d'une courbe en forme de N. Si cette même équation s'était limitée au deuxième degré, cette information serait perdue (Nourry, 2007)

2.3 Concept de découplage

Selon L'OCDE (2002) le concept de découplage consiste à briser le lien entre les « maux environnementaux » et les « biens économiques ». En d'autres termes, le découplage se réfère à une situation où le taux de croissance des pressions sur l'environnement est inférieur au taux de croissance économique.

Ce concept de découplage tire ses origines de la CKE. Même si dans les réflexions sur la CKE le terme découplage a été utilisé, ce n'est que dans les années 2000 qu'il fera l'objet d'un concept à part entière (Freitas et Kaneko, 2011). En effet, les ministres de l'environnement des pays membres de l'OCDE ont conclu lors de leur réunion annuelle en mai 2001 la nécessité de faire du découplage un objectif principal dans la première décennie du 21^e siècle. La vision qui a motivé de telles réflexions était que le concept de découplage soit utilisé comme un instrument dans l'évaluation de l'efficacité des politiques environnementales. L'OCDE, est souvent considérée comme la toute première institution à mener des réflexions sur le découplage en tant que concept. À la suite de l'OCDE, des institutions comme la Commission européenne, le programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), vont aussi intégrer le concept de découplage dans leurs réflexions afin d'accompagner les stratégies en faveur du

développement durable (Camara, 2015). Il existe deux concepts de découplage, à savoir le découplage relatif et le découplage absolu.

2.3.1 Découplage relatif

Le découplage relatif souvent connu sous le nom de découplage faible traduit une situation dans laquelle le taux de croissance des pressions sur l'environnement est inférieur à celui de la croissance économique. Les pressions sur l'environnement tout comme l'activité économique augmente, mais a des rythmes différents comme le montre la figure suivante :

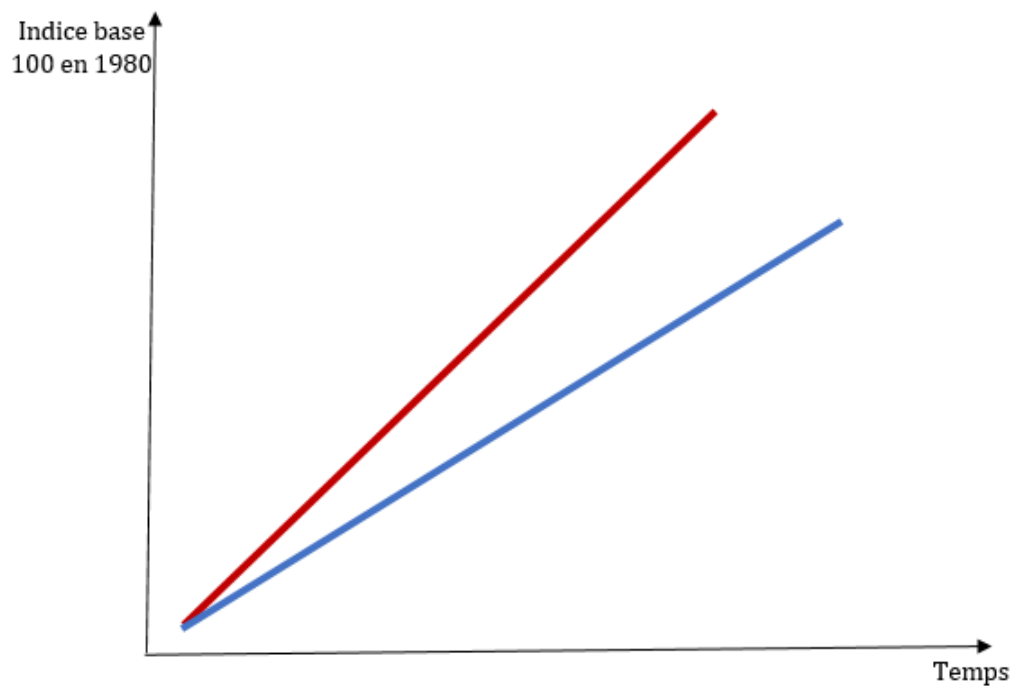


Figure 2.4 Exemple de découplage relatif (Inspiré de : Camara, 2015, P.70)

- Taux de croissance du PIB
- Taux de croissance des pressions sur l'environnement

Le taux de croissance de l'économie supérieur à celui des pressions sur l'environnement traduit une activité économique avec moins de dommages sur l'environnement. Ainsi la production des biens et des services se fait avec moins de ressources et d'émissions, dégageant ainsi une sorte d'efficience dans l'économie. En effet, la réduction des coûts de production permet aux entreprises de générer plus de profit, ce qui les incite à développer des technologies innovantes moins polluantes. Cette situation s'est caractérisée au fil des ans par la baisse de l'ordre de 33 % de l'intensité énergétique, c'est-à-dire la quantité d'énergie utilisée par unité de production à travers le monde. Ce fait est plus récurrent dans les pays développés, puisque dans ce dernier quart de siècle l'intensité énergétique des pays membres de l'OCDE a connu une baisse 3 fois plus importante que celle des pays non membres (Laurent, 2011)

2.3.2 Découplage absolu

Le découplage absolu ou découplage fort se produit lorsque les pressions sur l'environnement restent stables ou décroissent tandis que l'activité économique croît.

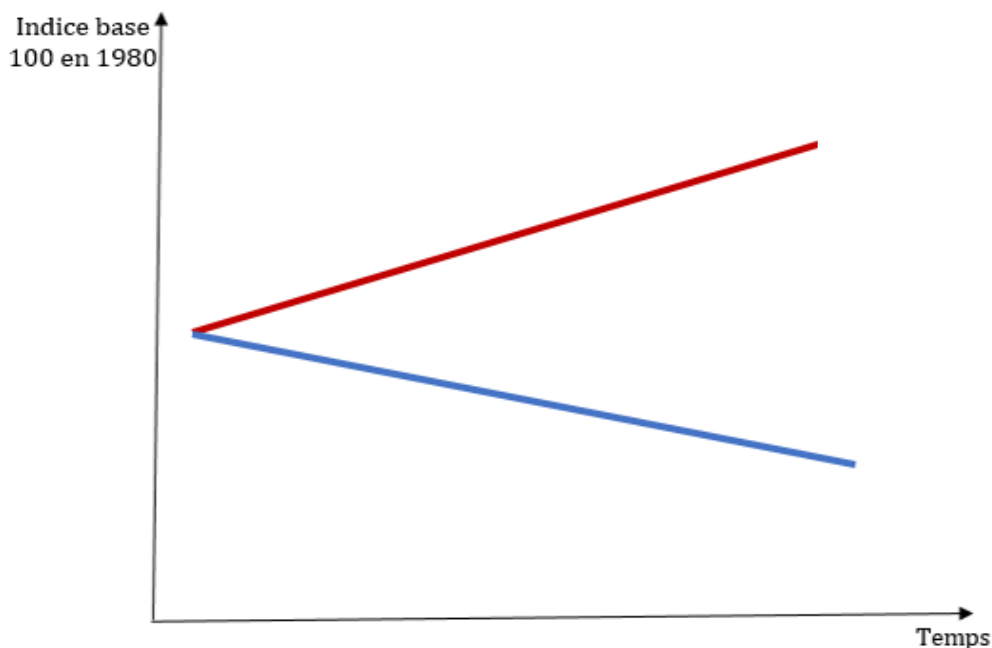


Figure 2.5 Exemple de découplage absolu (Inspiré de : Camara, 2015, P.71)

- Taux de croissance du PIB
- Taux de croissance des pressions sur l'environnement

Les réflexions sur le découplage absolu ont abouti à des conclusions controversées. En effet, le découplage absolu ne s'est produit que dans quelques pays, c'est-à-dire qu'il est moins fréquent que le découplage relatif.

Les États-Unis ont connu un découplage absolu au cours de la période 1979-1987 après le deuxième choc pétrolier. En effet, l'économie américaine a connu une croissance de 27 % avec une baisse de la consommation de pétrole de 17 % et une baisse de l'intensité énergétique de 35 %. L'Union européenne a aussi connu un épisode de découplage absolu sur la période 1996-2007.

Malgré ces exemples sur le découplage absolu, certains auteurs comme Jackson (2009) sont sceptiques face au réalisme de ce concept. Cet auteur fonde ses arguments sur une équation reliant l'activité humaine (I) à trois facteurs : un facteur taille de la population (P), un facteur PIB par habitant (A), un facteur technologie (T) qui capte les impacts associés à chaque dollar dépensé. Ainsi la décroissance du facteur T suffit pour observer un découplage relatif. Cependant, le découplage absolu ne peut se produire que dans le seul cas où le facteur (I) décroît en même temps que le facteur (T). Selon lui, il n'est possible de s'attendre à une telle situation que lorsque le rythme auquel (T) décroît dépasse celui de la croissance de la population et du PIB par habitant. Il existe donc deux catégories de variables qui déterminent l'impact environnemental de l'activité économique. La population et le PIB par habitant d'une part dont les effets sont négatifs et la technologie d'autre part qui a un effet positif. Les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental d'évolution (GIEC) sur le climat (2007) ont permis d'aboutir à des conclusions en faveur des arguments de cet auteur. En fait, leur travail sur l'évolution de certaines variables sur la période 1970-2004 a permis de constater une croissance des émissions de CO₂ de 1,9 %, une croissance annuelle de la population de 1,6 %, une croissance du PIB par habitant de 1,8 %, contre une baisse de l'intensité énergétique et carbonique respectivement de 1,2 % et 0,2 %. Ainsi le progrès technologique caractérisée par l'efficacité énergétique et la décarbonisation n'a pas été conséquent pour compenser la croissance de la population et du PIB par habitant d'où la difficulté de parvenir à un découplage absolu.

Laurent (2011) remet en cause la pertinence du découplage absolu qui a été constaté dans certains pays et s'interroge sur le rôle des transferts de pollution dans l'obtention de ces résultats. Son raisonnement est basé sur un constat selon lequel le découplage enregistré dans les pays de l'OCDE sur la période 1990-2008 correspond à une augmentation des émissions de CO₂ dans les pays émergents. Pourtant il est connu

que plusieurs firmes des pays de l'OCDE ont été délocalisées vers les pays émergents. C'est ainsi que l'auteur croit qu'il pourrait être plausible d'attribuer ce découplage simplement aux transferts de pollution. En outre, à la lumière des réflexions d'autres auteurs comme Dalvis et Caldeira (2010), Laurent (2011) attribue le découplage absolu des pays de l'Union européenne au système de comptabilisation des émissions de CO₂. En effet, les pays européens importent les produits les plus polluants, tandis que les émissions à la consommation ne sont pas comptabilisées. Si au lieu de prendre en compte les émissions à la production dans le calcul du découplage, il était pris en compte, les émissions de consommation de l'Union européenne n'allaient pas présenter un découplage absolu.

3. PROBLÉMATIQUE

La relation entre la croissance économique et l'environnement est controversée d'autant plus qu'il existe deux courants de pensée avec des prises de positions divergentes. Le premier soutient une compatibilité entre la croissance économique et la protection de l'environnement, tandis que le deuxième voit la croissance économique comme une source potentielle des pressions sur l'environnement (Godard, 2004).

Les émissions de CO₂ demeurent une grande préoccupation environnementale au regard des actions menées en faveur de leur réduction. Cependant les résultats de ces actions tardent à produire les effets escomptés (MDDELCC, 2015). C'est par exemple le cas du protocole de Kyoto que plusieurs pays développés dont le Canada ont quitté essentiellement à cause des transferts importants qu'ils doivent verser aux pays pauvres selon le principe d'émissions par tête. En effet, en moins qu'il n'y ait une inversion de la tendance actuelle, pour compenser leurs fortes émissions de CO₂ par tête, les pays développés devraient continuer à payer indéfiniment des transferts aux pays pauvres afin de financer des projets de restauration. Bien que les pays développés soient soucieux de la situation environnementale actuelle de plus en plus inquiétante, ils pensent que ces fonds pourraient être alloués à d'autres projets ou programmes dont les retombées seront plus directes et significatives pour leurs pays. (Dufour, 2012)

Au regard de ces courants de pensée antagonistes, on peut être amené à se poser des questions sur l'avenir des émissions de CO₂ à l'échelle planétaire : est-ce que la croissance économique devrait continuer à s'opérer au détriment de l'environnement dans le long terme? Y'aurait-il une époque dans l'histoire durant laquelle l'humanité accèdera à une décroissance notable des émissions de CO₂ tandis que la croissance économique poursuivra son rythme? Finalement est-ce que les pays pauvres rattraperont les pays riches en termes d'émissions par tête de CO₂ dans le long terme?

La relation de Kuznets environnementale donne une réponse aux deux premières questions. En fait, elle prédit que les émissions de CO₂ peuvent en un premier temps croître avec la croissance économique et décroître par la suite, formant ainsi une courbe en forme de U inversé, couramment connu sous le nom de courbe de Kuznets environnementale. En d'autres termes, la croissance se poursuivra à long terme avec une stabilisation ou même une réduction notable des émissions de CO₂ (Dinda, 2004). Cependant plusieurs auteurs ont développé des arguments à l'encontre de la CKE, remettant en cause sa capacité à pouvoir répondre à ces questions.

Quant à la dernière question, elle est abordée par la théorie de la convergence environnementale, précisément le bêta convergence absolue selon laquelle tous les pays pourraient avoir le même niveau d'émissions de CO₂ à long terme indépendamment de leurs caractéristiques économiques initiales. Selon Brock et Taylor (2004), cette théorie explique la CKE. Ce qui veut dire qu'elle apportera des éléments de réponses à toutes les questions qui sont posées dans le cadre de ce travail. Ces mêmes auteurs Brock et Taylor (2010), en s'appuyant sur le modèle vert de Solow ont testé la convergence absolue et conditionnelle des émissions de CO₂ pour 173 pays. Il ressort de leurs résultats que tous les pays inclus dans l'étude convergent vers le même état stationnaire en termes d'émissions par tête de CO₂. À la lumière de leur étude, les pays en voie de développement rattraperont les pays développés en matière d'émissions de CO₂ dans le long terme. Par exemple dans le cadre du protocole de Kyoto, cette situation est perçue comme une bonne nouvelle et pourrait susciter un regain d'intérêt en matière d'effort pour la préservation de l'environnement par les pays riches. Cependant la technique de mesure de la convergence, la méthode d'estimation, ainsi que le type de données que ces auteurs ont utilisé sont largement critiqués par le monde scientifique. Au regard de ces critiques, il est difficile de se fier à ces résultats dans la gestion de la politique environnementale internationale sans se tromper.

À partir d'ici, il est évident qu'une préoccupation pourrait être de tenter de comprendre ce qui arriverait si on prenait en compte ces remarques dans les études de convergence environnementales ultérieures. Existerait-il toujours de la convergence pour les émissions de CO₂ à l'échelle planétaire?

4. CONCEPT DE CONVERGENCE ET REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le concept de convergence émane du modèle de croissance néoclassique. Ainsi le modèle vert de Solow a été formalisé sur les principes fondamentaux du modèle néoclassique afin d'expliquer la CKE. En effet la mesure de la convergence environnementale que permet le modèle vert de Solow n'est qu'une autre façon d'expliquer la CKE. C'est pour cette raison qu'il existe une étroite relation entre la CKE et le modèle vert de Solow.

4.1. Origines du concept de la convergence : modèle de Solow (1956)

La théorie de la convergence tire ses racines du modèle néoclassique de Solow (1956) et Swan (1956). Une version simple de ce modèle est illustrée dans le cadre de ce travail afin de rendre compte des origines du concept de convergence. Il est évident que l'objectif de ce travail n'est pas d'étudier la convergence des revenus par tête comme il a été le cas pour les premières études qui se sont appuyées sur le modèle néoclassique. Cependant, ce modèle est un préalable qui devrait permettre de mieux cerner la théorie de la convergence environnementale.

3.1.1 Fonction de production quelques hypothèses

Ce modèle est formalisé dans une économie fermée, c'est-à-dire qu'il n'existe pas d'échange avec l'extérieur. Cette économie est composée de ménages qui consomment et d'entreprises qui produisent. Les ménages consomment une part de leur revenu. Quant aux entreprises, elles produisent un bien composite qui peut être utilisé pour l'investissement ou la consommation. En outre, il existe deux marchés, à savoir celui du bien produit et celui des facteurs de production utilisés dans la production. Ces deux marchés sont régis par le principe de concurrence pure et parfaite. (Le Gallo, 2002)

La fonction de production est de type Cobb-Douglas. Cette fonction tire son nom des travaux des auteurs Cobb et Douglas (1928) sur la croissance de l'économie américaine. Elle présente l'avantage de permettre la représentation de l'horizon technologique de l'entreprise, c'est-à-dire les différents choix possibles en termes de facteurs de production (Fruit, 1962)

$$Y_t = K_t^\alpha (A_t L_t)^{1-\alpha} \text{ avec } 0 < \alpha < 1 \quad \text{Eq 4.1}$$

Dans cette équation Y désigne le niveau de la production, K le stock de capital, L la quantité du facteur travail, et A la technologie. Cette dernière est supposée neutre au sens de Harrod (1939), c'est-à-dire

qu'elle n'a pour rôle essentiel que d'augmenter l'efficacité du facteur travail. Ainsi, A_t est considéré comme la force de travail mesurée en unités effectives, incorporant à la fois la quantité du travail ainsi que la productivité du travail déterminée par la technologie disponible (Le Gallo, 2002)

Les facteurs de production présentent des productivités marginales positives et décroissantes. En d'autres termes, une unité supplémentaire d'un facteur de production est moins productive que la précédente. La fonction de production est alors concave, c'est-à-dire qu'à un certain seuil le taux de croissance de la production diminue avec une augmentation continue d'un seul facteur de production.

Selon la deuxième hypothèse, la production est faite à rendements d'échelle constants, c'est-à-dire que lorsque les facteurs de production sont multipliés par un scalaire p , la production est aussi multipliée par ce même scalaire.

$$(pK_t)^\alpha (pA_tL_t)^{1-\alpha} = p^\alpha p^{1-\alpha} K_t(A_tL_t) = p^{1-\alpha+\alpha} K_t(A_tL_t) = pK_t(A_tL_t) = pY_t \quad \text{Eq 4.2}$$

Cette hypothèse permet d'écrire la fonction de production en termes d'unité de travail effectif :

$$y_{et} = \frac{Y_t}{A_tL_t} = \frac{K_t^\alpha (A_tL_t)^{1-\alpha}}{A_tL_t} = \left[\frac{K_t}{A_tL_t} \right]^\alpha = [k_{et}]^\alpha \quad \text{Eq4.3}$$

Avec y_{et} la production par travailleur effectif et k_{et} le capital par travailleur effectif

Une autre hypothèse se rapporte au respect des conditions d'Inada (1963). Ainsi la productivité marginale du capital tend vers l'infini lorsque le capital tend vers 0. De même quand la productivité le capital tend vers 0, la productivité marginale du capital tend vers l'infini

Le travail et la technologie croissent à des taux constants et exogènes :

$$\frac{dA_t}{dt} = g_A A_t \quad \text{Eq4.4}$$

$$\frac{dL_t}{dt} = n L_t \quad \text{Eq4.5}$$

Il ressort des équations 4.4 et 4.5 que la technologie et le travail croissent de façon exponentielle respectivement aux taux g_A et n . Soit A_0 et L_0 les valeurs respectives de A_t et L_t au temps $t=0$

$$L_t = L_0 e^{nt} \quad \text{Eq 4.6}$$

$$A_t = A_0 e^{g_A t} \quad \text{Eq 4.7}$$

3.1.2 Dynamique du modèle

La loi de la transition du capital dans une économie rend compte de la manière dont le capital est accumulé d'une période à une autre. Ainsi, sous l'hypothèse émise précédemment selon laquelle l'économie est fermée, la production est intégralement répartie entre la consommation et l'investissement. Aussi, il y'a une égalité entre l'investissement et l'épargne, permettant ainsi d'écrire :

$$Y = C + I = C + S \text{ avec } I = S \quad \text{Eq 4.8}$$

Une hypothèse selon laquelle une unité de production consacrée à l'investissement est susceptible de rapporter une unité de capital est faite. Aussi, le stock de capital physique se déprécie au taux constant δ qui est positif.

En s'appuyant sur l'équation 4.8, et en intégrant les hypothèses précédentes, la variation du stock de capital physique d'une période à une autre peut être écrite comme suit :

$$\frac{dK_t}{dt} = \dot{K} = I - \delta K = sY - \delta K \quad \text{Eq 4.9}$$

$\frac{dK_t}{dt}$ est la dérivée du capital par rapport au temps et désigne la variation du stock de capital ou l'investissement net.

Selon l'équation 4.3, le capital par unité de travail effectif est $k_e = \frac{K}{AL}$

$$\dot{k}_e = \frac{\dot{K}}{K} - \frac{\dot{A}}{A} - \frac{\dot{L}}{L} = \frac{\dot{K}}{K} - g_A - n \quad \text{Eq 4.10}$$

La suite consiste à trouver une expression de $\frac{\dot{K}}{K}$ à partir de l'équation 4.8 afin de la remplacer dans l'équation 4.10

$$\frac{\dot{K}}{AL} = \frac{sY}{AL} - \frac{\delta K}{AL} = sy_e - \delta k_e$$

Les termes de gauche et ceux de droite de cette équation sont multipliés par $\frac{1}{K}$

$$\frac{\dot{K}}{AL} \frac{1}{K} = \frac{1}{K} (sy_e - \delta k_e)$$

Il est maintenant possible de tirer une expression pour $\frac{\dot{K}}{K}$

$$\frac{\dot{K}}{K} = \frac{AL}{K} (sy_e - \delta k_e) = \frac{1}{k_e} (sy_e - \delta k_e) \quad \text{Eq 4.11}$$

Lorsque l'équation 4.11 est remplacée dans l'équation 4.10 on obtient l'équation de la dynamique du capital

$$\dot{k}_e = sk_{et}^\alpha - [\delta + n + g_A]k_{et} \quad \text{Eq 4.12}$$

A l'état stationnaire $\dot{k}_e = 0$, ce qui permet de déterminer une expression de k_e^* designant le capital de l'état stationnaire

$$k_e^* = \left(\frac{s}{[\delta + n + g_A]} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad \text{Eq 4.13}$$

La représentation graphique de l'état stationnaire est illustrée par la figure 4.1

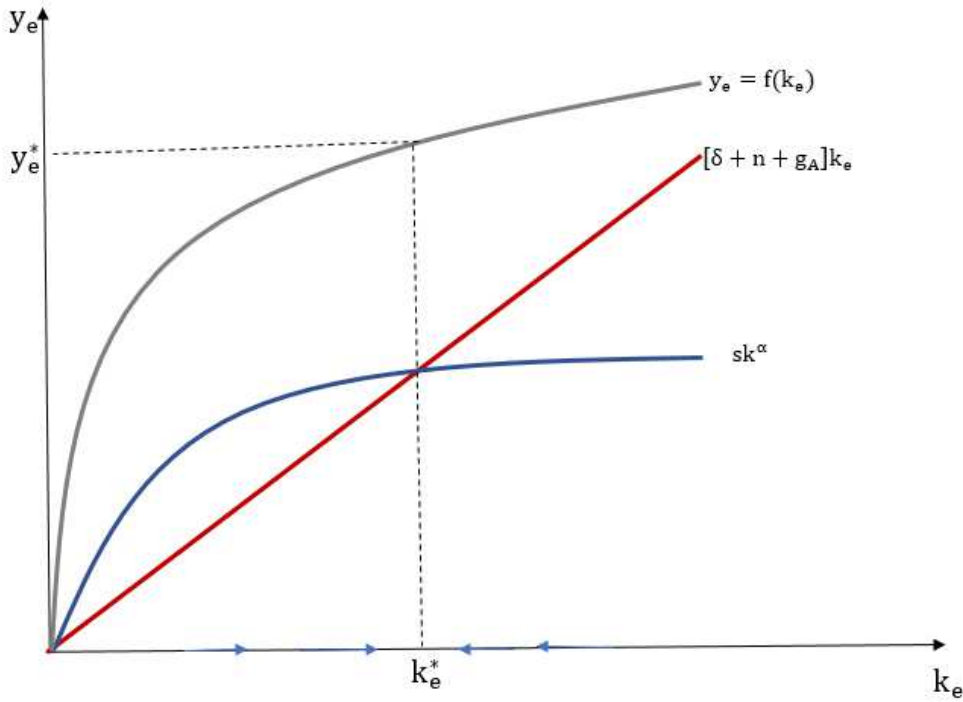


Figure 4.1 État stationnaire modèle de croissance néoclassique (Inspiré de : Mokime,2012,P.13)

A partir d'ici on peut déjà dire que les variables k_e et y_e convergent vers un sentier de croissance équilibrée avec un taux de croissance constant égal à $n + g_A$. La prédiction de ces résultats en termes de convergence signifierait que tous les pays devraient converger vers le même sentier de croissance équilibrée indépendamment de leur niveau de revenu initial. Il en découle alors les rudiments de la théorie de la convergence absolue.

Un développement limité de Taylor d'ordre 1 de l'équation 4.12 au voisinage de $\ln k_e^*$ permet de déterminer la vitesse de convergence qui désigne le taux auquel le rattrapage sera effectué. On obtient :

$$\dot{k}_e = [\alpha k_e^{*\alpha-1} - (\delta + n + g)](\ln k_e - \ln k_e^*) \quad \text{Eq 4.14}$$

Avec une substitution de l'équation 4.13 dans l'équation 4.14 on obtient :

$$\dot{k}_e = (\delta + n + g)(1 - \alpha)(\ln k_e - \ln k_e^*) \quad \text{Eq 4.15}$$

En posant $Z_t = (\ln k_e - \ln k_e^*)$ et $\beta = -(1 - \alpha)(\delta + n + g)$, Ainsi l'équation (12) devient :

$$dZ_t = -\beta Z_t \quad \text{Eq 4.16}$$

L'équation 4.16 est une équation différentielle qui donne l'information sur le taux de croissance de Z_t qui désigne l'écart entre le stock de capital courant à la période t et celui de l'état stationnaire.

Le sentier d'expansion de Z_t est tel que $Z_t = Z_0 e^{-\beta t}$ Avec Z_0 la valeur initiale de Z_t

Dans les études empiriques c'est généralement l'approximation log-linéaire de l'équation 4.16 qui est utilisée.

Selon l'équation 4.3 $y_{et} = k_{et}^\alpha$, ce qui signifie la vitesse de convergence pour la production par unité de travail effectif sera la même que celle du capital par unité de travail effectif qui a été mise en évidence dans l'équation 4.16

Il est alors possible d'écrire :

$$dX_t = -\beta X_t \quad (14) \text{ avec } X_t = \ln y_t - \ln y_t^* \leftrightarrow \frac{d \ln y_{et}}{dt} = -\beta [\ln y_{et} - \ln y_{et}^*] \quad \text{Eq 4.17}$$

La forme discrète de l'équation 4.16 est :

$$\ln y_{et} - \ln y_{et}^* = (1 - \beta) [\ln y_{et-1} - \ln y_{et}^*] \quad \text{Eq 4.18}$$

Avec les mêmes manipulations qui ont été faites pour k_e^* , à l'état stationnaire on obtient :

$$y_e^* = \left(\frac{s}{\delta + n + g} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \quad \text{Eq 4.19}$$

Au lieu du revenu par unité de travail effectif, lorsqu'on considère la production par tête à l'état stationnaire désigné par $y^* = \frac{Y}{L}$. L'idée est d'exprimer la production par tête en fonction de la production par unité de travail effectif à l'état stationnaire.

$$\text{A l'état stationnaire } y_e^* = \frac{Y}{AL} \leftrightarrow \frac{Y}{L} = y_e^* A = y^*$$

$$y^* = A \left(\frac{s}{\delta+n+g} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \quad \text{Eq 4.20}$$

La log linéarisation de l'équation 4.20 donne :

$$\ln y_t^* = \ln(A_0) + g_t + \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln(s) - \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln(\delta + n + g_A) \quad \text{Eq 4.21}$$

La substitution de l'équation 4.21 dans l'équation 4.18 donne :

$$\ln y_t - \ln y_{t-1} = \ln A_0 + g_t + \frac{\alpha\beta}{1-\beta} \ln s - \frac{\alpha\beta}{1-\beta} \ln(\delta + n + g_A) - \beta \ln y_{t-1} \quad \text{Eq4.22}$$

Il convient de préciser que la littérature des études empiriques sur la convergence s'est fondée sur l'équation 4.22. L'estimation de l'équation 4.22 permet de rendre une décision sur la convergence des revenus par tête. En effet, si β est significatif et différent de zéro, il est possible de conclure que les pays pauvres devraient rattraper les pays riches en termes de revenus par tête. Il convient de préciser que dans la suite de ce travail une version simplifiée de l'équation 4.22 sera utilisée.

4.2. Modèle vert de Solow et la convergence environnementale

Le modèle vert de Solow, développé par Brock et Taylor (2004), est une application du concept de convergence à l'environnement. Il s'appuie sur le modèle néoclassique de Solow (1956) pour expliquer la CKE.

4.2.1 Point de départ du modèle

Une fonction de production Y de type Cobb Douglas à rendements constants et concave a été prise en compte dans le cadre de ce modèle.

$$Y = F(K, AL) \quad \text{Eq 4.23}$$

Avec K le capital, A la technologie et L la taille de la population.

\dot{K} désigne la différence entre le capital de la période $T+1$ et celui de la période T .

$$\dot{K} = K_{T+1} - K_T = I - \delta K \quad \text{Eq 4.24}$$

Avec I l'investissement et δK la dépréciation du capital.

Tout comme le modèle précédent, Il est possible de réécrire cette expression, étant donné qu'en économie fermée l'épargne est égale à l'investissement ($I = S$). Ce dernier n'est qu'une part de la production, ce qui permet d'écrire :

$S = sY$, avec s le taux d'épargne

$$\dot{K} = S - \delta K = sY - \delta K$$

Le taux de croissance de la population ainsi que celui de la technologie sont semblables à ceux développés dans le modèle néoclassique, conformément aux équations 4.3 et 4.5.

4.2.2 Introduction de la pollution dans le modèle

L'intégration de la pollution dans le modèle requiert une hypothèse selon laquelle chaque unité de l'activité économique F génère Ω unités de pollution comme produit joint. Il convient aussi de noter que la quantité de pollution rejetée dans l'atmosphère est différente de la quantité émise sous l'hypothèse de l'existence d'une activité de dépollution. Cette dernière s'opère à rendements constants avec une fonction de production strictement concave. En outre, elle croît au fur et à mesure que l'activité économique F s'intensifie, tout en augmentant l'effort de dépollution noté F^D . Ainsi une quantité de dépollution D engendre une réduction de la pollution totale rejetée dans l'atmosphère de ΩD unités. À partir de cette formalisation, une première équation théorique peut être écrite :

$$\text{pollution rejetée} = \text{pollution créée} - \text{dépollution} \quad \text{Eq 4.25}$$

La pollution créée désigne celle qui est produite pendant la production tandis que la pollution rejetée se réfère à celle qui se retrouve finalement dans l'atmosphère.

À partir de cette équation il est possible d'écrire :

$$E = \Omega F - \Omega D(F, F^D) \quad \text{Eq 4.26}$$

Lorsque ΩF est mis en facteur et sous l'hypothèse des rendements constants, l'équation 4.26 devient :

$$E = \Omega F \left[1 - D\left(1, \frac{F^D}{F}\right) \right] \quad \text{Eq 4.27}$$

Quand on pose $d(\theta) = 1 - D\left(1, \frac{F^D}{F}\right)$, on obtient :

$$E = \Omega F d(\theta) \quad \text{Eq 4.28}$$

$\theta = \frac{F^D}{F}$ et désigne la fraction de l'activité économique allouée à l'activité de dépollution. On obtient finalement :

$$E = \Omega F (1 - \theta) \quad \text{Eq 4.2}$$

Avec cette expression, il est possible de réécrire la fonction de production en intégrant une composante de la pollution :

$$Y = (1 - \theta) F(K, AL) \quad \text{Eq 4.30}$$

La production par travailleur effectif et le capital par travailleur effectif sont exprimés respectivement par $y = \frac{Y}{AL}$ et $k = \frac{K}{AL}$

F étant une fonction Cobb Douglas à rendements constants, il est possible de remplacer Y et K par leurs expressives respectives afin d'obtenir une autre expression du capital par travailleur effectif et de la production par travailleur effectif :

$$y = \frac{Y}{AL} = (1 - \theta) \frac{F(K, AL)}{AL} = (1 - \theta) F\left(\frac{K}{AL}, 1\right) = (1 - \theta) f(k) \quad \text{Eq 4.31}$$

Selon l'équation 4.24 $\dot{K} = sY - \delta K$

Étant donné que $k = \frac{K}{AL}$ le taux de croissance du capital par travailleur effectif $\frac{\dot{k}}{k}$ est telque :

$$\frac{\dot{k}}{k} = \frac{\dot{K}}{K} - \frac{\dot{A}}{A} - \frac{\dot{L}}{L} \quad \text{Eq 4.32}$$

Selon l'équation 4.24 $\dot{K} = sY - \delta K$

Divisons cette expression par L :

$$\frac{\dot{K}}{L} = \frac{sY}{L} - \frac{\delta K}{L} = sy - \delta k$$

Lorsque cette expression est multipliée par $\frac{1}{K}$, on obtient :

$$\frac{\dot{K}}{L} \frac{1}{K} = \frac{1}{K} (sy - \delta k) \quad \leftrightarrow \quad \frac{\dot{K}}{K} = \frac{L}{K} (sy - \delta k) = \frac{1}{k} (sy - \delta k)$$

Remplaçons $\frac{\dot{K}}{K}$ par sa valeur dans l'équation 4.31 :

$$\frac{\dot{k}}{k} = \frac{1}{k} (sy - \delta k) - g_A - n \quad \text{Eq 4.33}$$

Substituons y par son expression de l'équation 4.30 dans l'équation 4.32 :

$$\frac{\dot{k}}{k} = \frac{1}{k} [s(1 - \Theta)f(k) - \delta k] - g_A - n$$

$$\dot{k} = s(1 - \Theta)f(k) - \delta k - (\delta + g_A + n)k \quad \text{Eq 4.34}$$

Déterminons le taux de croissance de la pollution $\frac{\dot{E}}{E}$:

Selon l'équation 4.29 $E = \Omega F(K, AL)(1 - \Theta)$. Faisons l'hypothèse que la fonction de production est sous la forme $F(K, AL) = ALk^\alpha$ et substituons cette expression dans l'équation 4.29 :

$$E = \Omega ALk^\alpha (1 - \Theta)$$

$$\frac{\dot{E}}{E} = \frac{\dot{\Omega}}{\Omega} + \frac{\dot{A}}{A} + \frac{\dot{L}}{L} + \alpha \frac{\dot{k}}{k} \quad \text{Eq 4.35}$$

$$\text{A l'état stationnaire } \dot{k} = 0 \quad \leftrightarrow \quad \frac{\dot{E}}{E} = \frac{\dot{\Omega}}{\Omega} + \frac{\dot{A}}{A} + \frac{\dot{L}}{L}$$

$$\text{Notons } \frac{\dot{E}}{E} = g_E, \frac{\dot{A}}{A} = g_A, \frac{\dot{\Omega}}{\Omega} = -g_D \text{ et } \frac{\dot{L}}{L} = n$$

On obtient :

$$g_E = -g_D + g_A + n \quad \text{Eq 4.36}$$

La composante $g_A + n$ mesure le taux de croissance de l'économie lorsqu'elle est à son état régulier et représente l'effet d'échelle. Cependant g_D mesure le progrès technique dans l'activité de dépollution et représente donc l'effet technique. Ainsi une croissance soutenue se traduit par un taux de croissance des émissions g_E négatif. Les conditions qui pourraient conduire à une telle situation dans une économie sont :

$$g_A > 0 \quad \text{et} \quad g_D > g_A + n \quad \text{Eq 4.37}$$

4.2.4 Relation entre le modèle vert de Solow et la CKE

Il est possible d'avoir une expression du niveau des émissions par tête de CO2 sous forme d'équation différentielle

$$E = A(0)L(0)\Omega(0)d(\theta) \exp[g_{Et}] k^\alpha \quad \text{Eq 4.38}$$

Avec $A(0)$, $L(0)$ et $\Omega(0)$ les conditions initiales

Le taux de croissance des émissions peut être déduit de l'équation 4.38

$$\frac{\dot{E}}{E} = g_E + \alpha \frac{\dot{k}}{k} \quad \text{Eq 4.39}$$

En substituant l'équation 4.33 dans l'équation 4.38 on obtient :

$$\frac{\dot{k}}{k} = sk^{\alpha-1}(1 - \theta) - (\delta + n + g_A) \quad \text{Eq 4.40}$$

La relation entre la dynamique de l'accumulation du capital et l'évolution du niveau des émissions sera établie à partir des équations 4.39 et 4.40

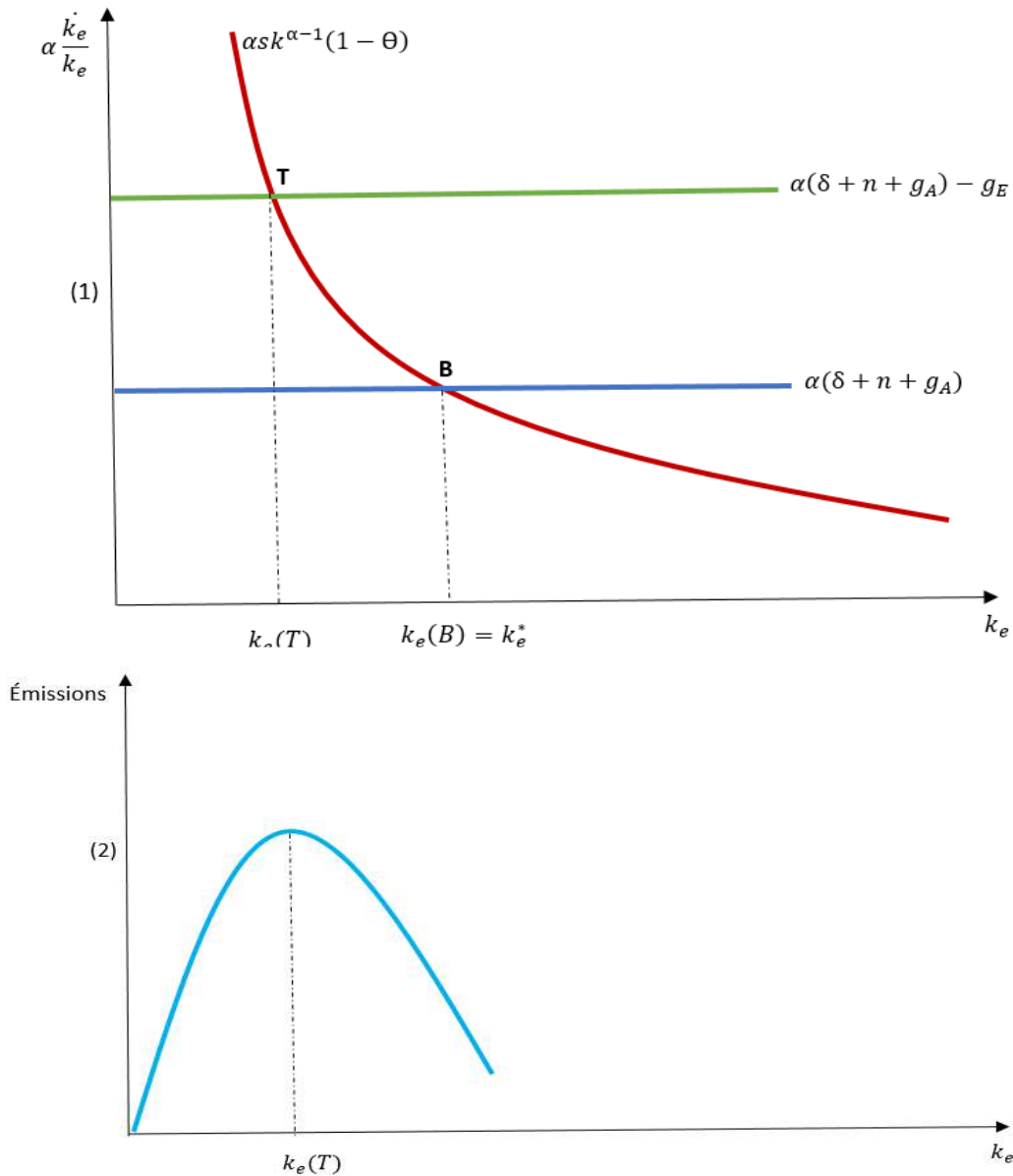


Figure 4.2 Relation modèle vert de Solow et CKE (Inspiré de : Brock et Taylor, 2010, P.137)

Le graphique comprend deux schémas superposés dont le premier représente le taux de variation de l'accumulation du capital en fonction du capital par travailleur effectif. Le second représente la courbe de l'évolution des émissions de CO2 en fonction du capital par travailleur effectif.

Le premier schéma découle de l'équation 4.40. L'écart entre la courbe décroissante ayant pour équation $\alpha s k^{\alpha-1} (1 - \theta)$ et la droite horizontale d'équation $\alpha(\delta + n + g_A)$ désigne α fois le taux de croissance du capital par travailleur effectif. Le point d'intersection B est obtenu par l'égalité entre les deux équations

avec $ke(B)$ le capital par travailleur effectif à l'état stationnaire.

$$\alpha sk^{\alpha-1}(1 - \Theta) = \alpha(\delta + n + g_A) \quad \text{Eq 4.41}$$

Un déplacement vers k_e^* , à gauche du point B se traduit par une augmentation du capital par travailleur effectif. Cependant, un déplacement vers k_e^* , à droite du point B se caractérise par une baisse du capital par travailleur effectif. Il est important de noter que lorsqu'une économie atteint le point B, elle est dans son état stationnaire et ne pourra retourner à gauche ou à droite de ce point. En supposant que g_E est une constante et en se référant à l'équation 4.39, le taux de croissance des émissions agrégées $\frac{\dot{E}}{E}$ aura les mêmes caractéristiques que le capital par tête.

De même l'écart entre la courbe décroissante d'équation $\alpha sk^{\alpha-1}(1 - \Theta)$ et la droite horizontale d'équation $\alpha(\delta + n + g_A) - g_E$ se rencontre au point T et détermine le taux de croissance des émissions par tête de CO2. Au point T le taux de croissance des émissions est nul donc :

$$\alpha sk^{\alpha-1}(1 - \Theta) = \alpha(\delta + n + g_A) - g_E \quad \text{Eq 4.42}$$

Le taux de croissance des émissions s'annulant au point T, il est possible de déduire qu'à gauche de T le taux de croissance devrait être positif. Par contre à droite de T il devrait être négatif, c'est-à-dire que les émissions sont dans la phase de décroissance. Ce point pourrait évidemment avoir une similarité avec le point de retournement dont il est question dans la CKE.

Une projection verticale du point T vers le deuxième schéma permet de remarquer qu'il coïncide avec le point de retournement de la CKE. Il est important de signaler que cette situation ne peut se produire que sous certaines hypothèses. La première stipule que la croissance est soutenable, c'est-à-dire que g_E est négatif. Quant à la deuxième hypothèse, le point T doit toujours être à gauche du point B. Lorsque ces hypothèses sont réunies la dynamique de l'accumulation du capital permet d'expliquer la CKE, dégageant ainsi la relation étroite entre le modèle vert de Solow et la CKE. Par contre, lorsque le point T est à droite du point B, c'est-à-dire que g_E est positif, le point de retournement ne se produira pas. Ainsi l'économie sera caractérisée par une croissance continue des émissions de CO2 sans qu'il n'y ait une issue à long terme pour une éventuelle baisse de ces émissions.

4.2.3 Convergence environnementale à partir du modèle vert de Solow

Les émissions par tête à une période t notées e_t , peuvent être définies comme le rapport entre les émissions agrégées E_t et la taille de la population L_t pour la même période. Il en est de même pour le taux de croissance des revenus par tête, définis par le rapport entre les revenus agrégés et la taille de la population

$$e_t = \frac{E_t}{L_t} \quad \text{Eq 4.43}$$

$$y_t = \frac{Y_t}{L_t} \quad \text{Eq 4.44}$$

$$\text{D'après l'équation 4.30 } Y_t = F_t(1 - \theta) \Leftrightarrow F_t = \frac{Y_t}{1-\theta}$$

La substitution de cette expression dans l'équation 4.44 permet d'écrire :

$$y_t = \frac{F_t(1 - \theta)}{L_t}$$

En s'inspirant de l'équation 4.28, il est possible d'écrire :

$$E_t = \Omega_t d(\theta) F_t$$

En remplaçant F_t par son expression tirée à partir de l'équation 4.29, on obtient

$$E_t = \frac{\Omega_t d(\theta) Y_t}{1-\theta} \quad \text{Eq 4.45}$$

$$\frac{E_t}{L_t} = \frac{\Omega_t d(\theta) Y_t}{(1-\theta)L_t} = \Omega_t d(\hat{\theta}) y_t = e_t \quad \text{avec } d(\hat{\theta}) = \frac{d(\theta)}{(1-\theta)} \quad \text{Eq 4.46}$$

À partir de l'équation 4.40, le taux de croissance des émissions par tête sera donc :

$$\frac{\dot{e}}{e} = \frac{\dot{\Omega}}{\Omega} + \frac{\dot{y}}{y} = -g_D + \frac{\dot{y}}{y} \quad \text{Eq 4.47}$$

Une approximation log linéaire du taux de croissance des émissions par tête et des revenus par tête sur une période de temps T permet d'écrire :

$$\frac{1}{T} \log \frac{e_t}{e_{t-T}} = -g_D + \frac{1}{T} \log \frac{y_t}{y_{t-T}} \quad \text{Eq 4.48}$$

Avec $\frac{1}{T} \log \frac{e_t}{e_{t-T}}$ le taux de croissance des émissions par tête en logarithme sur la période T, et $\frac{1}{T} \log \frac{y_t}{y_{t-T}}$ le taux de croissance en logarithme des revenus par tête sur la période T.

Afin d'éliminer le taux de croissance des revenus par tête dans cette équation, une approximation log linéaire des revenus par tête autour de l'état stationnaire sera utilisée. Cette équation a été développée par Barro (1991) et Mankiw, Römer et Weil (1992) dans le cadre des études de convergence des revenus par tête.

$$\frac{1}{T} \log \frac{y_t}{y_{t-T}} = b - \frac{1 - \exp[-\lambda T]}{T} \log y_{t-T} \quad \text{Eq 4.49}$$

Avec b la constante et $\lambda = [1 - \alpha][n + g_A + \delta]$ est la vitesse de convergence vers l'état stationnaire.

Pour la suite, il s'agira d'exprimer les revenus par tête en fonction des émissions par tête afin de pouvoir procéder à l'élimination du taux de croissance des revenus par tête dans l'équation 4.48

Selon l'équation 4.46 :

$$e_t = \Omega_t d(\hat{\theta}) y_t \leftrightarrow y_t = \frac{e_t}{\Omega_t d(\hat{\theta})} \quad \text{Eq 4.50}$$

À partir de l'équation 4.44 une expression y_{t-T} sera :

$$y_{t-T} = \frac{e_{t-T}}{\Omega_{t-T} d(\hat{\theta})} \quad \text{Eq 4.51}$$

Ainsi, le taux de croissance des revenus obtenu dans l'équation 4.49 est substitué dans l'équation 4.48, tout en remplaçant y_{t-T} par son expression dans l'équation 4.51.

Après avoir effectué ces substitutions, une nouvelle équation est obtenue. Cette dernière permet de vérifier l'hypothèse de la convergence des émissions de CO2 :

$$\frac{1}{T} \log \frac{e_{it}}{e_{it-T}} = \alpha + \beta \log[e_{it-T}] + u_{it} \quad \text{Eq 4.52}$$

Le terme $\frac{1}{T} \log \frac{e_{it}}{e_{it-T}}$ mesure dans le cadre de ce travail le taux de croissance des émissions de CO₂ d'un pays i sur une période de temps T . Le terme $\log[e_{it-T}]$ mesure les émissions par tête de CO₂ d'un pays i à la période initiale. La décision relative à l'existence ou l'inexistence de convergence des émissions de CO₂ est prise selon la significativité et le signe du coefficient β , pour une convergence, on s'attend que $\beta < 0$.

4.3 Les différents types de mesure de la convergence environnementale

Il existe plusieurs techniques pour vérifier l'hypothèse de la convergence environnementale. La première qui a été employée dès les premières réflexions sur les questions de convergence est la mesure de la bêta (β) convergence absolue. Des critiques ont été formulées sur cette dernière, conduisant au développement d'autres techniques tels la β convergence conditionnelle, les clubs de convergence, la sigma convergence et la convergence stochastique.

4.3.1 La β -convergence absolue

Ce concept stipule que les pays qui détiennent des niveaux bas d'émissions par tête de CO₂ présentent un taux de croissance de ces émissions plus élevées que celui des pays à forte émissions quelques soient leurs conditions initiales. Pour ce faire les pays à faibles émissions rattraperont à long terme les pays à fortes émissions. En d'autres termes tous les pays, qu'ils soient riches ou pauvres, devraient converger vers le même niveau d'émissions par tête de CO₂ à long terme indépendamment de leurs conditions au départ. Ce niveau d'émissions est un état stationnaire dans lequel le taux de croissance des émissions est nul. La vitesse du rattrapage qui peut être mesurée à travers β selon l'équation. Étant la même pour les deux types de pays mesure la vitesse à laquelle cette convergence devrait avoir lieu, d'où le concept de β -convergence. Il est important de préciser que ce concept se fonde sur l'hypothèse selon laquelle tous les pays présentent la même fonction de production ainsi que les mêmes caractéristiques structurelles. C'est seulement le capital par travailleur effectif initial qui peut varier d'un pays à un autre.

Sur le plan empirique, l'analyse de la convergence absolue sur une période T revient à établir une relation entre le taux de croissance des émissions par tête de CO₂ et le niveau initial de ces émissions. L'équation suivante rend compte de cette relation selon le modèle vert de Solow développé par Brock et Taylor (2004)

$$\frac{1}{T} \log \left[\frac{e_{it}}{e_{it-T}} \right] = \alpha + \beta \log[e_{it-T}] + \varepsilon_{it} \quad \text{Eq 4.53}$$

La vérification de l'hypothèse de la bêta convergence est basée sur le coefficient de convergence β . Ainsi lorsque β est négatif et significatif à un certain seuil, l'évidence de la convergence absolue se dégage. En d'autres termes, cela signifie que le taux de croissance moyen des émissions par tête de CO2 est négativement corrélé avec leur niveau initial. C'est ce qui permet de conclure que le taux de croissance des émissions dans les pays pauvres est supérieur à celui des pays riches.

4.3.2 La β -convergence conditionnelle

Les hypothèses qui sous-tendent la bêta convergence absolue ont été remises en cause par plusieurs auteurs. En effet, la convergence absolue est fondée sur l'hypothèse selon laquelle les pays pauvres comme les pays riches ont accès à la même technologie et leurs économies présentent des caractéristiques structurelles similaires en ce qui concerne le taux d'épargne, le taux de croissance de la population, la dépréciation du capital. Ce qui permettait de faire la distinction entre les pays pauvres et les pays riches était simplement leur niveau initial d'émissions de CO2. Dans la réalité des faits, il est moins réaliste de dire que les économies pauvres et les économies riches présentent les mêmes caractéristiques structurelles. (Le Gallo, 2002). Ainsi des pays dont les économies présentent des différences structurelles en matière d'émissions de CO2 devraient chacun tendre vers son propre état stationnaire d'émissions d'émissions par tête de CO2.

La convergence conditionnelle peut aussi être empiriquement vérifiée. Il suffit d'ajouter à l'équation qui permet de vérifier la convergence absolue des variables explicatives qui peuvent capter les caractéristiques structurelles des économies comme le taux d'épargne ou le taux de croissance de la population. (Criado 2010)

$$\frac{1}{T} \log \left[\frac{e_{it}}{e_{it-T}} \right] = \alpha + \beta \log[e_{it-T}] + \lambda X_{it} \varepsilon_{it} \quad \text{Eq 4.54}$$

X_{it} est le vecteur des variables conditionnelles comme le taux de croissance de la population, le taux d'épargne, l'ouverture au commerce international. Tout comme la convergence absolue, la décision sur l'existence d'une convergence conditionnelle est basée sur le coefficient β .

4.3.3 Les clubs de convergence

Un club de convergence peut être défini comme un groupe de pays dont les économies présentent les mêmes caractéristiques structurelles avec des conditions initiales très proches (Le Gallo, 2002). Selon Durlauf et Johnson (1995) les études qui ont porté sur des grands échantillons n'ont pas pu vérifier l'hypothèse de la convergence. Pour ce faire les sous-échantillons de pays présentant des similarités en ce qui concerne leurs comportements d'émissions pourraient être plus susceptibles de converger vers le même niveau d'émissions de CO2 par tête à long terme.

La vérification de l'existence des clubs de convergence se fait en utilisant exactement l'équation de la convergence absolue, cependant une équation est attribuée à chaque club. Considérons un échantillon qui contient deux clubs : un club A et un club B. Les équations qui permettent d'analyser la convergence des émissions de CO2 de ces clubs sont :

$$\frac{1}{T} \log \left[\frac{e_{it}}{e_{it-T}} \right] = \alpha_A + \beta_A \log[e_{it-T}] + \varepsilon_{it} \quad \text{Pour le club A} \quad \text{Eq 4.55}$$

$$\frac{1}{T} \log \left[\frac{e_{it}}{e_{it-T}} \right] = \alpha_B + \beta_B \log[e_{it-T}] + \varepsilon_{it} \quad \text{Pour le club B} \quad \text{Eq 4.56}$$

4.3.4 La sigma-convergence

L'approche de la sigma-convergence se réfère à l'analyse de l'évolution dynamique d'un indicateur de dispersion des émissions par tête de CO2 au sein d'un ensemble de pays ou de régions. L'existence de la convergence se rattache à une diminution de cette dispersion. De manière plus précise, une comparaison est faite entre l'indicateur de dispersion calculé en fin de période et celui calculé en début de période.

Deux indicateurs sont essentiellement utilisés dans le test de la sigma-convergence, à savoir l'écart type des émissions par tête de CO2 en logarithme ou le coefficient de variation. Les deux expressions suivantes désignent respectivement l'écart type en logarithme et le coefficient de variation (Le Gallo, 2002).

$$v_t = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\log \left(\frac{e_{it}}{e_t^*} \right) \right]^2} \quad \text{avec} \quad \log e_t^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log e_{it} \quad \text{Eq 4.57}$$

$$c_t = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{e_{it} - \bar{e}_t}{\bar{e}_t} \right)^2} \quad \text{avec} \quad \bar{e}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_{it} \quad \text{Eq 4.58}$$

$\log e_t^*$ est la moyenne en logarithme des émissions par tête de CO2 d'un pays i au temps t . N désigne le nombre de pays, et \bar{e}_t la moyenne des émissions par tête de CO2 au temps t .

4.3.5 La convergence stochastique

Greasley et Oxley (1997) et Durlauf (1996) ont remis en cause les différents types de mesure de la convergence qui utilisent les données en coupe transversale. En fait, ces auteurs estiment que les données en série chronologique contiennent des informations qui pourraient mieux rendre compte de la convergence lorsqu'on prend en compte la dimension de long terme. Avec ce type de données, les phénomènes dynamiques sont mieux captés.

Selon Durlauf (1996), en considérant deux pays i et j avec e_{it} et e_{jt} les séries temporelles de leurs émissions par tête de CO₂, il existe de la convergence lorsque l'écart en logarithme entre les deux séries tend vers 0 à long terme.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(\ln e_{i,t+k} - \ln e_{j,t+k} | I_t) = 0 \quad \text{Eq 4.59}$$

E désigne l'espérance et I_t l'ensemble des informations disponibles à la période t . En d'autres termes, cette équation signifie que la limite quand t tend vers l'infini de l'espérance de l'écart des émissions entre le pays i et le pays j , connaissant les informations de la période t , doit être nulle.

4.4 Revue de la littérature sur les études de convergence environnementale

La littérature actuelle sur les études de convergence des émissions de CO₂ est très controversée dépendamment de la méthode utilisée, de la zone d'étude et de la période d'étude. En effet il existe une série d'études qui sont arrivées à démontrer la convergence des émissions de CO₂, cependant d'autres ont dégagé la preuve d'une divergence. Une petite revue de littérature sur la question en témoignera.

Les premiers auteurs à réaliser une étude sur la convergence environnementale ont été Strazicich et List (2003). En utilisant des données en coupe transversale et en série chronologique, ces auteurs ont vérifié à la fois l'hypothèse de la convergence conditionnelle et stochastique des émissions de CO₂ de 21 pays industrialisés sur la période 1960-1997. Deux tests ont été mis en œuvre à cet effet, à savoir le test de convergence en coupe transversale et le test de racine unitaire pour la convergence stochastique. L'hypothèse nulle de ces deux tests se referait à la présence de divergence. Cette hypothèse a été rejetée pour tous les deux tests, conduisant à la conclusion de l'existence d'une convergence conditionnelle et stochastique pour les 21 pays industrialisés.

À la suite de ces auteurs, Brock et Taylor (2004) ont apporté des éléments de réponses au lien entre la croissance économique et l'environnement en développant le modèle vert de Solow. En effet, ils se sont basés sur le modèle néoclassique de croissance de Solow (1956) auquel ils ont introduit une composante à même de mesurer les activités de pollutions. Ces auteurs ont établi le lien entre l'accumulation du capital et l'évolution de la pollution, ce qui leur a permis de donner une nouvelle dynamique à la CKE. En s'appuyant sur le modèle vert de Solow, ils ont pu tester l'hypothèse pour les pays de l'OCDE. Les résultats de leur étude révèlent la présence de convergence pour les pays de l'OCDE.

Nguyen et Van (2005) ont utilisé la méthode non paramétrique pour mesurer la convergence de 100 pays dont 26 de l'OCDE et 74 du reste du monde sur la période 1966-1996. Leur analyse est basée sur toute la distribution des émissions par tête de CO₂, à la différence des autres travaux qui se sont appuyés sur les comportements des émissions. Les auteurs à l'issue de leur analyse ont fait remarquer que l'hypothèse de la convergence varie selon le niveau d'émissions des pays. En effet, les pays qui ont de fortes émissions par rapport à la moyenne de l'échantillon présentent des émissions par tête relatives décroissantes. Cependant les pays qui ont un faible niveau d'émissions par rapport à la moyenne présentent une tendance à la hausse de leurs émissions par tête relative. Ainsi les résultats révèlent une présence de convergence pour les pays de l'OCDE et une faible convergence pour les pays du reste du monde.

Stegman (2005) a examiné la dynamique de la distribution des émissions par tête de CO₂ au moyen de la technique d'estimation stochastique de Kernel. Il ressort des résultats qu'il existe une faible évidence de la convergence des émissions par tête de CO₂ de 97 pays sur la période 1950-1999. Cette convergence est même inexistante pour les pays qui des taux de croissance élevés. L'auteur souligne que les modèles de projection qui prédisent une convergence des émissions par tête de CO₂ sont incompatibles avec le comportement empirique de la dynamique de la distribution des émissions par tête de CO₂.

Aldy (2006) a effectué le test de sigma convergence sur les données en panel de 88 pays du monde et 21 pays de l'OCDE sur la période 1960-2000. En utilisant l'écart type en logarithme comme mesure de la dispersion, il fait constater qu'il décroît pour les pays de l'OCDE et croît faiblement pour les pays du reste du monde. Ainsi il conclut sur l'existence de la convergence des émissions par tête de CO₂ pour les pays de l'OCDE et une absence pour les pays du reste du monde.

Criard et Grether (2011) ont réalisé une étude sur la convergence des émissions de CO₂ de 166 pays sur la période 1960-2002. Leur étude n'a pas utilisé le test de convergence classique, mais plutôt une approche basée sur la distribution spatiale des émissions. Il ressort des résultats de cette étude que les émissions de CO₂ ont divergé avant le choc pétrolier des années 1970, mais sur la période 1980-2000 la distribution est relativement plus stable.

De Oliveira et De Vargas-Mores (2015) ont testé l'hypothèse de la convergence sur des données de panel dynamique de 118 pays du monde. L'échantillon global a été divisé en clubs de convergence, à savoir l'Asie, l'Amérique latine, les pays non producteurs de pétrole, les pays à faibles revenus, les pays à revenus élevés. Il a utilisé l'estimateur des effets fixes et des effets aléatoires dans l'estimation de l'équation de convergence. Il ressort des résultats une évidence de la convergence des émissions par tête de CO₂ à la fois pour les pays du monde et pour tous les clubs. En outre, les pays de l'Asie et de l'Amérique latine présentent une vitesse de convergence supérieure à celle des autres pays.

Une étude plus récente sur cette question réalisée par Rios et Gianmoena (2016) a porté sur 141 pays sur la période 1970-2014. Cette étude est basée sur le modèle vert de Solow avec une prise en compte des externalités technologiques. Ces auteurs ont pu démontrer l'existence d'une convergence des émissions de CO₂ entre les 141 pays du monde.

5. MÉTHODOLOGIE ET ANALYSE

Le test de l'hypothèse de la convergence des émissions de CO₂ à l'échelle planétaire requiert l'utilisation de données sur les émissions par tête de CO₂ et d'autres variables qui seront présentées. Les statistiques descriptives, même si elles n'ont pas un pouvoir de décision sur l'existence de la convergence, permettent d'avoir une vision globale sur les données. En outre, il est important de faire un choix approprié pour la méthode d'estimation de l'équation de convergence, car la fiabilité des résultats en dépend.

5.1 Données

Les données utilisées dans le cadre de ce travail proviennent de la base *World Développement Indicators* (WDI) de la banque mondiale. Il s'agit précisément des données se rapportant aux émissions par tête de CO₂ exprimées en tonnes métriques et couvrant la période 1960-2014. Dans le cadre de la mesure de la convergence conditionnelle, trois variables structurelles sont utilisées. Il s'agit du taux de croissance de la population, du taux d'épargne et du taux d'ouverture au commerce international. Le taux d'épargne, représenté par le taux d'investissement est calculé à partir de la formation brute du capital en pourcentage du PIB. Ensuite le taux d'ouverture commerciale est le ratio de la somme des importations et des exportations sur le PIB. Une description de ces variables est donnée dans l'annexe 1.

Il est important de noter la différence entre les données en coupe transversale, les données chronologiques et les données de panel. En effet les données en coupe transversale, se réfèrent à un échantillon de pays, d'individus ou de ménages qui ont été observés à un certain moment donné dans le temps. Dans le cadre de ce travail, des données en coupe transversale pourraient être les émissions de CO₂ de 151 pays en 2013. Quant aux données chronologiques, elles se rapportent à l'observation d'une ou de plusieurs variables au cours du temps à plusieurs reprises. Il peut s'agir par exemple des données sur les émissions par tête de CO₂ ou du taux d'épargne d'un pays sur la période 1960-2013. Il existe pour chaque année une observation dans ce pays pour la variable. La dimension temporelle est ainsi mise en évidence. En ce qui concerne les données de panel, elles constituent une combinaison des données chronologiques et des données en coupe transversale. En d'autres termes, il s'agit d'un échantillon en coupe transversale qui a été observé plusieurs fois au cours d'une période de temps donnée. Ainsi pour ce travail des données de panel pourraient être par exemple les émissions de CO₂ par tête de 151 pays de

1960 à 2013. Chaque pays est donc observé chaque année durant la période qui couvre l'étude (Wooldridge, 2002)

Ce travail utilise essentiellement des données en coupe transversale de 151 pays du monde en 1960 et en 2013 ainsi que des données de panel sur la période 1960-2014. La particularité des données de panel dans cette étude réside dans le fait que les observations ne sont pas prises en compte pour chaque année. En effet, la période d'étude a été divisée en 11 sous périodes de 5ans à savoir 1960-1964, 1965-1969, 1970-1974, 1975-1979, 1980-1984, 1985-1989, 1990-1994, 1995-1999, 2000-2004, 2005-2009, 2010-2014. Ainsi, chaque pays a été observé pour les 11 sous périodes.

Par ailleurs deux catégories de sous échantillons ont été constituées pour l'analyse des clubs de convergence

- Sous échantillons formés de groupes de pays à l'échelle des continents : Afrique subsaharienne, Asie, Europe, Amérique latines
- sous échantillons à l'échelle des institutions de coopération et d'intégration économique : l'UE, OCDE, la Communauté économique des états de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO)

La description complète des sous-échantillons incluant les pays qui les composent est donnée dans l'annexe 2.

5.2 Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives permettent de décrire de manière synthétique des données observées afin de mieux les analyser. Cette description peut être faite au moyen d'une représentation graphique ou par le calcul de résumés numériques (Baccini, 2010).

Dans le cadre de ce travail, les résumés numériques comme la moyenne, l'écart type, le minimum et le maximum, ainsi que la représentation graphique de certaines variables seront utilisés. Le tableau 5.1 présente les statistiques descriptives des variables qui seront utilisées pour le test de convergence. Ces résultats sont obtenus à partir d'une analyse des données de la banque mondiale au moyen du logiciel *stata*.

Tableau 5.1 Statistiques descriptives des émissions par tête de CO2 et des variables conditionnelles

VARIABLES	NBRE OBS	MOYENNE	ECART TYPE	MINIMUM	MAXIMUM
Émissions par tête de CO2 de 1960	151	2,082812	4,469582	0,0080169	36,68518
Taux de croissance des émissions par tête de CO2 entre 1960 et 2013	151	0,0246948	0,018577	-0,025230	0,0937661
Taux d'épargne en	151	23,1455	6,566201	6,160856	63,92387
Taux de croissance annuelle population en	142	1,831371	1,136312	-0,1564724	8,183222

Il est tout d'abord important de noter que pour le taux d'épargne et le taux de croissance de la population, l'observation pour chaque pays est la moyenne des observations sur la période 1960-2013. Ainsi les données pour ces variables sont en coupe transversale. Il ressort de ce tableau que dans les années 1960 pour 151 pays du monde la moyenne des émissions par tête de CO2 était de 2,08 tonnes métriques(tm). Pour cette année, les émissions étaient très disproportionnées à travers le monde puisque le minimum était de 0.008 tm par tête alors que le maximum atteignait 36,68. Ce fait s'explique par le fait que l'échantillon comprend des pays, notamment ceux de l'Afrique subsaharienne, pour lesquels le secteur industriel était au stade embryonnaire dans les années 1960. La tendance globale des émissions par tête de CO2 sur la période 1960-2013 est donnée par la figure5.1 .

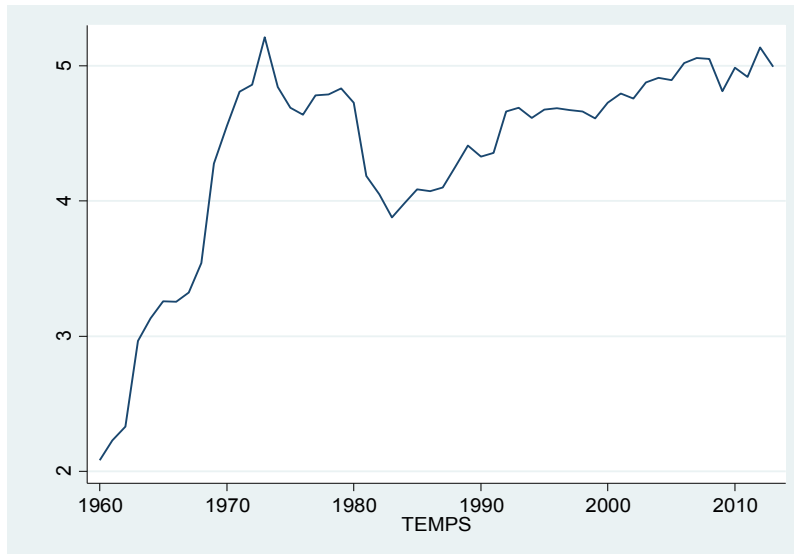


Figure 5.1 Émissions par tête de CO2 au niveau mondial de 1960 à 2013

Il ressort de la figure une croissance accélérée des émissions par tête de CO2 de 1960 à 1973. À partir des années 1973, la courbe a une allure décroissante, ce qui pourrait correspondre à la prise de conscience environnementale des années 1970. De 1985 à 2008, l'allure de la courbe n'est pas stable, mais elle présente une tendance croissance. Il est possible de remarquer sur la courbe que la crise économique des années 2008 a conduit à une baisse remarquable des émissions par tête de CO2. Après les années 2009, les émissions par tête de CO2 ont recommencé à croître.

Le tableau 5.1 révèle que le taux de croissance moyen des émissions par tête de CO2 entre 1960 et 2013, mesuré par la variable dépendante de l'équation 4.53, à savoir $\frac{1}{T} \log \left[\frac{e_{it}}{e_{it-T}} \right]$, est de 2,46 %. Il convient de signaler qu'il est négatif pour certains pays, c'est-à-dire qu'en moyenne, ces pays ont connu une régression de leurs émissions par tête de CO2. Il s'agit par exemple de la République démocratique du Congo, avec un taux de croissance moyen de -2,52 %, représentant le minimum des 151 pays. Cette situation pourrait se comprendre par le fait que ce pays a connu une explosion démographique alors qu'il n'est pas industrialisé. En effet, sa population est passée de 13 millions en 1960 à plus de 85 millions en 2017 (Atlas des populations et Pays du Monde, 2017). De même, il existe des pays qui ont connu une forte croissance de leurs émissions par tête de CO2. Il s'agit par exemple des Émirats arabes unis, avec un taux de croissance moyen de 9,37 %. Cette situation pourrait s'expliquer par le fait que ce pays fait partie des plus grands producteurs de pétrole.

En ce qui concerne taux d'épargne pour les 151 pays de l'échantillon, en moyenne 24,18 % du PIB ont été alloués aux investissements. Le minimum de ce taux est de 6,16 % pour la Guinée-Bissau tandis que le maximum a atteint 63,92 % pour la Guinée équatoriale. La figure 5.2 représente l'évolution du taux d'épargne de 1960 à 2013.

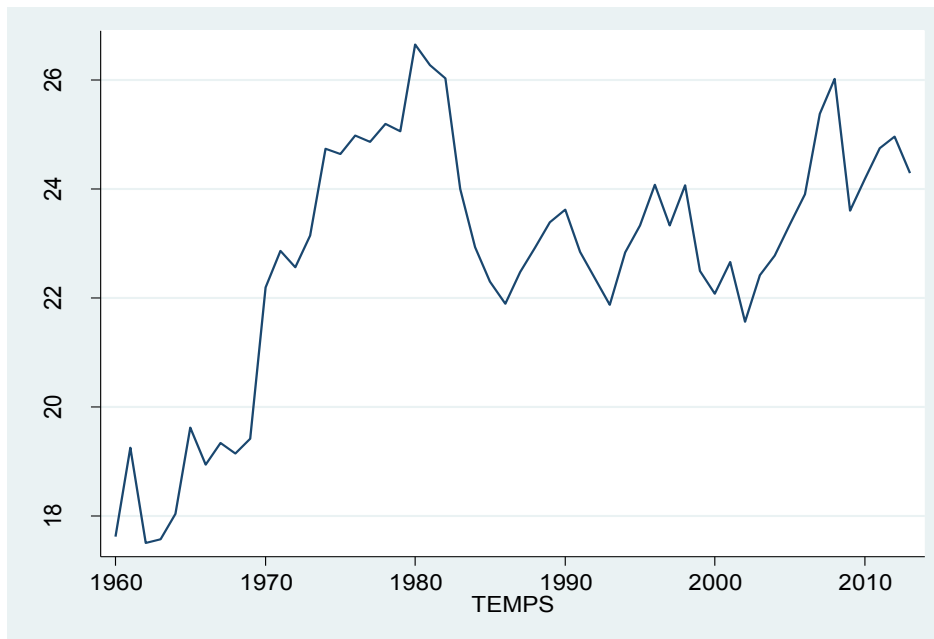


Figure 5.2 Évolution du taux d'épargne de 1960 à 2013

Le taux de croissance annuel moyen de la population est de 1,83 % pour 142 pays. Les Émirats arabes unis possèdent le fort taux de croissance annuelle dans l'échantillon, soit 8,18 %. Quant à la Bulgarie, elle a connu en moyenne une régression de sa population, soit un taux de croissance annuelle de -0,15 %, correspondant au minimum.

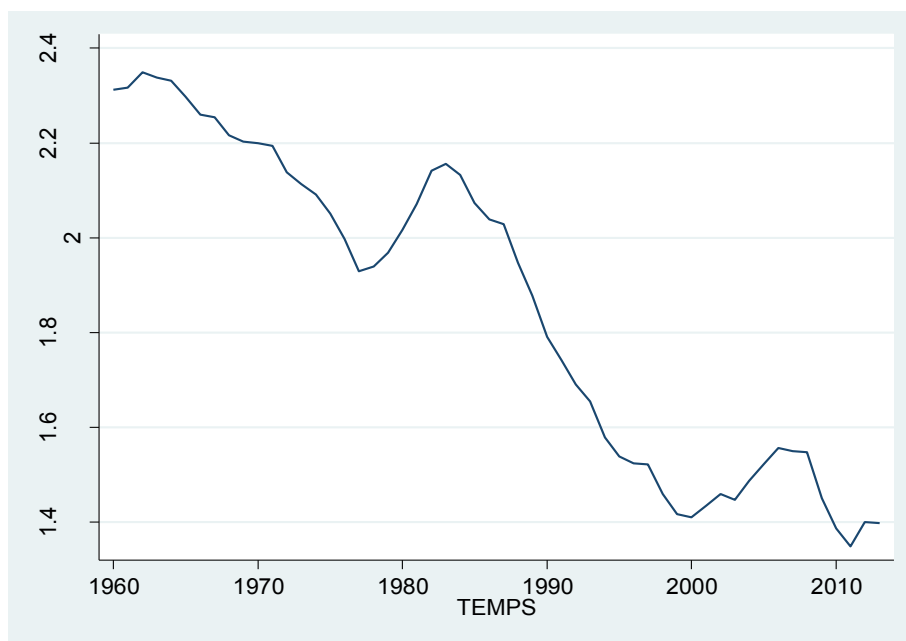


Figure 5.3 Évolution du taux de croissance de la population de 1960 à 2013

Il ressort de la figure 5.3 que le taux de croissance de la population a connu une tendance à la baisse de 1960 à 2013. Dans les années 1978, il a connu une hausse relative jusqu'aux années 1985. Ensuite de 1985 à 2000 une nouvelle vague de décroissance est enregistrée. Aussi de 2000 à 2008 la courbe est de nouveau croissante avant de connaître une rupture dans les années 2008. Il semble que la crise économique des années 2008 a eu un impact négatif sur la croissance démographique mondiale.

5.3 Méthode d'estimation de l'équation de convergence

La vérification de l'hypothèse de la convergence environnementale requiert l'estimation de l'équation de convergence. Dans le cadre de ce travail, deux méthodes d'estimation seront essentiellement utilisées dépendamment de la nature des données. La première est la méthode d'estimation des moindres carrés ordinaires (MCO) qui est retenue pour l'analyse des données en coupe transversale afin de comparer les résultats à ceux de Brock et Taylor (2004 et 2010). La méthode des moments généralisés (GMM) développée par Arellano et Bond (1991) est la seconde qui sera utilisée pour les données de panel en vue de corriger les imperfections de la première méthode.

5.3.1 Méthode d'estimation MCO

Il est possible de réécrire l'équation 4.53 sous la forme :

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i$$

Eq 5.1

Dans cette nouvelle équation y_i représente le taux de croissance des émissions de CO2 entre 1960 et 2013. x_i désigne le niveau des émissions de chaque pays à la période initiale, c'est-à-dire 1960. Cette équation a pour objectif d'établir une relation de dépendance entre y_i et x_i . Ainsi y_i est appelée variable endogène ou variable expliquée ou variable dépendante, car c'est elle que l'on tente d'expliquer à travers x_i . De même x_i étant la variable qui explique y_i , elle est appelée variable explicative ou variable exogène ou variable indépendante. ε_i désigne le terme aléatoire ou le terme d'erreur, représentant ainsi la part de l'information qui n'a pas pu être expliquée par la relation entre y_i et x_i .

Un nuage de points peut être représenté à partir des valeurs observées de y_i et x_i . Il est donc associé à chaque valeur du taux de croissance des émissions de CO2 d'un pays i , le niveau initial de ces émissions.

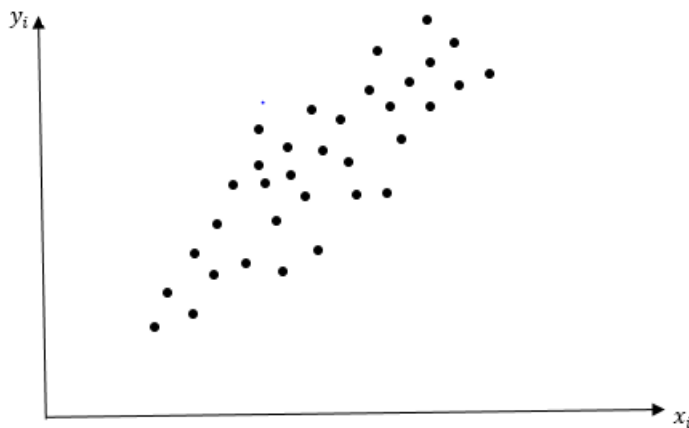


Figure 5.4 Nuage de points du taux de croissance des émissions par tête de CO2 en fonction leur niveau initial

L'objectif dans la méthode MCO est de trouver une droite qui représente la tendance globale de ce nuage de points de sorte à pouvoir trouver des valeurs estimées des paramètres α et β qui se rapprocheraient le mieux possible de la réalité.

Si les paramètres α et β sont estimés, l'équation 5.1 peut être réécrite sous la forme :

$$\hat{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x_i$$

Eq5.2

Il est donc possible d'avoir une nouvelle expression pour y_i à partir de l'équation 5.2 :

$$y_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x_i + \varepsilon_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i$$

Eq 5.3

À partir de l'équation 5.3, une expression pour le terme d'erreur peut être déduite :

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$$

Eq 5.4

Il ressort de l'équation 5.4 que le terme d'erreur est la différence entre la valeur observée et la valeur estimée des y_i .

La technique MCO consiste alors à trouver une forme estimée de l'équation qui permet de minimiser la somme des carrés des erreurs ε_i entre les valeurs observées et les valeurs estimées ou prédites de y_i

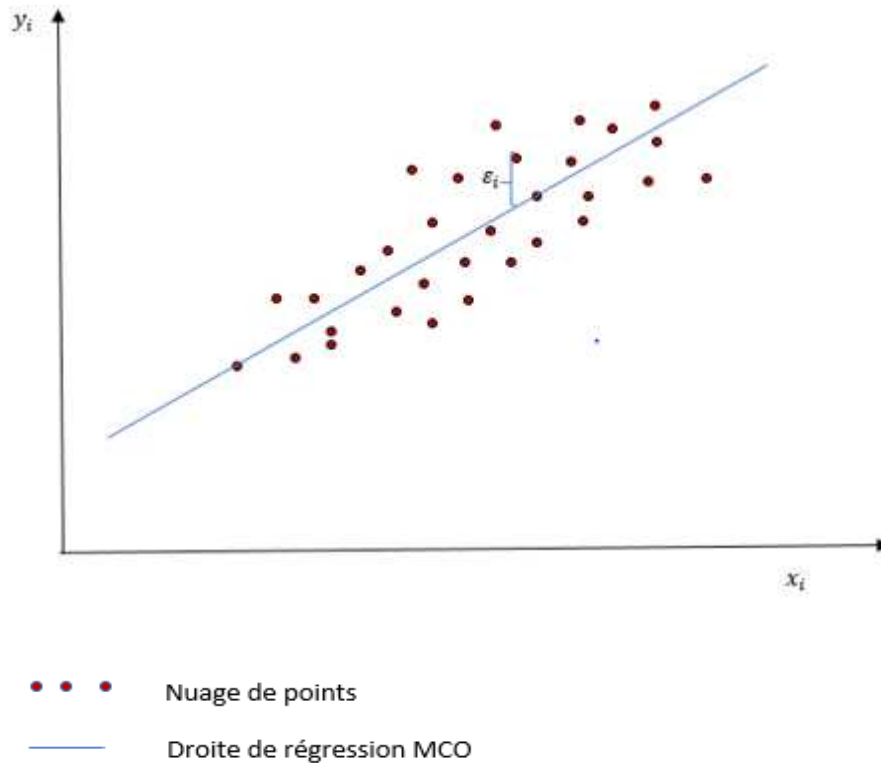


Figure 5.5 Représentation graphique de la méthode d'estimation MCO

La méthode d'estimation MCO est basée sur certaines hypothèses qu'il convient de rappeler :

- Les y_i et les x_i sont mesurées sans erreur. L'erreur est d'Esperance nulle, ce qui permet de dire que le modèle est bien spécifié
- Les erreurs sont homoscedastiques, c'est-à-dire que leur variance est constante
- Les erreurs sont non corrélées, c'est-à-dire que les erreurs entre deux observations sont indépendantes
- Les termes aléatoires sont indépendamment et identiquement distribués. Aussi, Ils sont indépendants des observations

5.3.2 Limites de la méthode d'estimation MCO

La méthode MCO n'est fiable que lorsque toutes les hypothèses sur lesquelles elle s'appuie sont réunies. Dans la réalité cette méthode rencontre plusieurs problèmes qui remettent en cause sa capacité de pouvoir rendre compte de la convergence des émissions de CO₂. Il s'agit entre autres des problèmes liés à l'omissions de certaines variables explicatives, aux erreurs de mesures et à la simultanéité.

Pour expliquer une variable, il est important d'inclure dans l'équation toutes les variables explicatives qui contiennent de l'information à même d'expliquer la variable dépendante. Ainsi, lorsqu'une variable est omise, le modèle est mal spécifié, remettant en cause la précision de l'estimation. En effet il est évident que le terme d'erreur pourrait contenir des variables omises qui sont aussi corrélées avec les régresseurs. Les paramètres estimés seront donc biaisés (Le Gallo, 2002)

Le problème de simultanéité intervient lorsque les variables explicatives ne sont pas exogènes. Ce problème signifie la situation dans laquelle la variable explicative a un pouvoir explicatif sur la variable dépendante qui, elle aussi de façon réciproque a un pouvoir explicatif sur la variable explicative. Autrement, la variable dépendante est aussi une variable explicative de la variable qui est retenue initialement dans le modèle comme variable explicative (Givord, 2006)

En outre, un autre problème auquel l'estimation MCO est confrontée est le fait de considérer que toutes les observations sont homogènes, c'est-à-dire qu'il y'a pas d'observations présentant des caractéristiques spécifiques. L'application de cette hypothèse dans le cadre de ce travail reviendrait à supposer que tous les pays ont le même comportement en matière d'émissions de CO₂. Une comparaison faite entre les pays industrialisés et les pays pauvres laisse voir que cette considération est peu réaliste.

Au regard des problèmes que l'estimation MCO rencontre, il est difficile de l'utiliser pour rendre une décision sur la présence ou l'absence de convergence des émissions de CO₂ à l'échelle planétaire. C'est pourquoi la méthode d'estimation GMM semble mieux appropriée.

5.3.3 Méthode d'estimation GMM

Selon Islam (2003) l'utilisation des données de panel permet de corriger certains problèmes comme celui de l'hétérogénéité inobservée et des variables omises soulevés dans l'estimation MCO en coupe transversale. C'est ce qui justifie le choix qui a été porté sur les données de Panel dans ce travail.

Les travaux de Caselli et Leffort (1990) ont permis de réécrire l'équation 4.54 sous forme de panel dynamique :

$$\ln(e_{it}) = \alpha_{it} + (1 + \beta)\ln e_{it-1} + \lambda \ln(X_{it}) + \varepsilon_{it} \quad \text{Eq 5.5}$$

Cette équation est dite dynamique parce qu'elle relie les émissions d'une année t à celles d'une année $t-1$. Il y'a donc une variable dépendante retardée dans l'équation.

$\ln e_{it}$ désigne les émissions de CO2 d'un pays i au temps t en logarithme, $\ln e_{it-1}$ les émissions de CO2 d'un pays i au temps $t-1$, β le coefficient de convergence, X_{it} un ensemble de variables de contrôle pour chaque pays i affecté de son coefficient λ . Le terme α_{it} rend compte des spécificités individuelles.

Le problème lié aux spécificités individuelles est susceptible d'être éliminé en utilisant la différence première de l'équation 5.5.

$$\ln(e_{it}) - \ln(e_{it-1}) = (1 + \beta)(\ln e_{it-1} - \ln e_{it-2}) + \lambda(\ln X_{it} - \ln X_{it-1}) - +(\varepsilon_{it} - \varepsilon_{it-1}) \quad \text{Eq 5.6}$$

Dans l'équation 5.6 la composante à l'origine des spécificités individuelles α_{it} n'existe plus. Cependant, il existe une corrélation entre la variable retardée e_{it-1} et le terme d'erreur ε_{it} . Si l'estimateur MCO est utilisé à ce stade, il sera biaisé puisque la variable retardée est endogène. Il faudra donc trouver un estimateur qui tienne compte à la fois des spécificités individuelles et de l'endogénéité. C'est ainsi qu'Arellano et Bond (1991) ont démontré que dans un cadre de panel dynamique, la méthode des moments généralisés (GMM) est la mieux appropriée pour corriger les défaillances de l'estimateur MCO. Il est important de noter qu'il existe deux types de méthode d'estimation GMM, à savoir le GMM en différence et le système GMM.

L'estimation GMM en différence consiste à s'appuyer sur l'équation 5.6 pour résoudre le problème des spécificités individuelles et utiliser des instruments pour les variables endogènes. Un instrument est une variable qui est corrélée avec la variable endogène et non corrélée avec le terme d'erreur. La particularité de l'estimation GMM en différence est qu'elle utilise les variables en niveau retardées d'une période ou plus pour instrumenter les variables explicatives de l'équation en première différence.

Les auteurs comme Arellano et Bover (1995), Blundell et Bond (1998) ont démontré dans leurs travaux que les instruments utilisés dans l'estimation GMM en différence sont faibles, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas susceptibles de corriger efficacement le problème d'endogénéité. Pour ce faire, selon ces auteurs l'estimateur GMM en différence est biaisé lorsque l'échantillon est fini comme le cas de l'échantillon choisi pour ce travail.

Pour résoudre ce problème, ces auteurs ont proposé la méthode d'estimation système GMM. Cette méthode combine l'équation en première différence et l'équation en niveau, c'est-à-dire respectivement les équations 5.5 et 5.6. Ainsi pour l'équation en première différence, les variables retardées en niveau sont utilisées comme instruments. De même pour l'équation en niveau les instruments sont les premières différences des variables en niveau. Blundell et Bond (1998) ont réussi à démontrer à travers des simulations Monte-Carlo que l'estimation en système GMM est plus efficiente que celle en différence. C'est pour cette raison que dans le cadre de ce travail l'estimation en système GMM sera utilisée pour la mesure de la convergence conditionnelle en panel dynamique.

5.4 Résultats et interprétation

L'analyse des données est faite essentiellement en deux étapes avec le logiciel d'économétrie et de statistiques *stata*. La première utilise les données en coupe transversale des années 1960 et 2013 pour vérifier l'hypothèse de la convergence absolue et conditionnelle en référence aux travaux de Brock et Taylor (2004 et 2010). Quant à la deuxième, elle utilise les données de Panel avec la méthode d'estimation Système GMM pour vérifier l'hypothèse de la convergence conditionnelle.

5.4.1 Convergence absolue et conditionnelle en coupe transversale

Les résultats de l'estimation de l'équation 4.53 et 4.54 avec la méthode MCO sont présentés dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 Estimation MCO de l'équation de convergence absolue et conditionnelle

Variables indépendantes	A	B
Log des émissions par tête de CO2 initiales	-0,00497*** [0.000751]	-0,00641*** [0.000765]
Log du taux de croissance population		0.000513 [0.00183]
Log du taux d'épargne		0.0293*** [0.00449]
Constante	0.0215*** [0.00142]	-0.0705*** [0.0142]
Vitesse de convergence	0,57 %	0,78 %
Période de demi-vie	139ans	107ans
N	151	142
r2	0.227	0.416

À chaque variable explicative dans le tableau sont associées deux valeurs superposées dont la première représente la valeur des coefficients estimés, et la seconde entre crochet, la valeur des erreurs estimées. Les étoiles quant à elles déterminent le seuil de significativité qui peut être de 1 %, 5%, et 10 %. Il convient de signaler que le plus significatif est le seuil de 1 %, ce qui voudra dire en d'autres termes qu'il existe 1 % de chance de se tromper dans l'estimation de l'équation. Ainsi, un coefficient significatif d'une variable explicative signifie qu'elle contient effectivement de l'information qui permet d'expliquer la variable dépendante. La colonne A contient les résultats de la convergence absolue tandis que la colonne B contient ceux de la convergence conditionnelle.

Il convient de rappeler qu'il existe de la convergence lorsque le coefficient β est négatif et significatif. En ce qui concerne la convergence absolue $\beta = -0,0049$ et significatif au seuil de 1 %. Il existe donc une convergence des émissions de CO2 pour les 151 pays du monde dont la liste se trouve dans l'annexe3.

En ce qui concerne la convergence conditionnelle c'est à dire la colonne B, $\beta = -0.00641$. Ce coefficient est aussi négatif et significatif au seuil de 1 %, faisant ainsi remarquer la présence de convergence des émissions de CO2 pour 142 pays dont la liste se trouve dans l'annexe4. En outre, parmi les deux variables représentant les caractéristiques des économies faisant partie de cette étude, seul le coefficient du taux d'épargne est significatif et positif. Ce résultat signifie qu'une augmentation des investissements à travers l'épargne est accompagnée d'une augmentation des émissions de CO2. De manière plus précise, une augmentation du taux d'épargne de 1 % se traduit par une augmentation du taux de croissance des émissions par tête de 0.02 %.

La vitesse de convergence de 0,57 % pour la convergence absolue mesure la vitesse à laquelle les pays convergent vers l'équilibre stationnaire en termes d'émissions par tête de CO2 (Le Gallo, 2002). Autrement, les pays se rapprochent de l'état stationnaire en moyenne de 0,57 % par année. Cette vitesse est plus élevée pour la convergence conditionnelle, soit 0,78 %.

La période de demi-vie mesure le temps qu'il faudra aux pays pour combler la moitié de la distance qui les sépare de l'état stationnaire. Elle est de 139 ans pour la convergence absolue contre 107 ans pour la convergence conditionnelle. Cette différence est normale puisqu'en termes de convergence conditionnelle les pays avancent plus vite vers l'état stationnaire.

5.4.2 Détection des clubs de convergence

Le tableau 5.2 rend compte des résultats de la vérification de l'hypothèse de la convergence des émissions de Co2 des clubs qui ont été constitués à l'échelle des continents.

Tableau 5.3 Estimation MCO de l'équation de convergence des clubs AFRQUE, AMÉRIQUE LATINE, ASIE et EUROPE

Variables	AFRIQUE		AMERIQUE LATINE		ASIE		EUROPE	
	A	B	C	D	E	F	G	H
Log des émissions par tête de CO2 initiales	-0,00634*** [0.00271]	-0,00872*** [0.00251]	-0,00764*** [0.00187]	-0,00728*** [0.00158]	-0,00667*** [0.00183]	-0,00888*** [0.00146]	-0,0135*** [0.00182]	-0,0134*** [0.00183]
Log du taux de croissance Population		-0.0117 [0.0155]		-0.00791*** [0.00247]		0.0118*** [0.00416]		0.000682 [0.00295]
Log du taux d'épargne		0.0237*** [0.00756]		0.00839 [0.00805]		0.0396*** [0.00989]		-0.0138 [0.0158]
Vitesse de convergence	0.77	1.17	0.98	0.92	0.82	1.2	2.41	2.38
Periode de demi-vie	108	79	90	94	103	77	50	51
Constante	0.00858 [0.00732]	-0.0560* [0.0307]	0.0227*** [0.00218]	-0.00169 [0.0253]	0.0299*** [0.00290]	-0.105*** [0.0324]	0.0283*** [0.00281]	0.0719 [0.0506]
N	38	37	34	33	35	33	27	23
r2	0.132	0.377	0.343	0.583	0.287	0.620	0.686	0.745

En ce qui concerne la convergence absolue, il ressort de ce tableau que tous les clubs présentent un coefficient de convergence négatif et significatif au seuil de 1 %. Il existe donc une convergence absolue des émissions par tête de CO₂ pour ces clubs. Il est important de souligner que l'ampleur de cette convergence n'est pas la même pour tous les clubs. L'Afrique présente la plus faible vitesse de convergence qui est de 0.77 % avec une période de demi-vie de 108ans. Elle est suivie de l'Asie dont la vitesse est de 0.82 % avec une période de demi-vie de 103 ans. Ensuite vient l'Amérique latine avec une vitesse de convergence de 0.98 %, soit une période de demi-vie de 90ans. Le continent européen quant à lui, présente la plus grande vitesse de convergence parmi tous les clubs, soit 2,41 % avec une période de demi-vie de 50ans. Ce fait pourrait s'expliquer par le fait que la plupart des pays de ce club font partie de l'Union européenne qui a mis en place des politiques environnementales communes. Ces dernières favorisent donc une forte convergence au sein de ce club.

Pour ce qui est de la convergence conditionnelle, les coefficients de convergence des quatre clubs sont aussi négatifs et significatifs au seuil de 1 %, rendant compte de la présence d'une convergence conditionnelle des émissions par tête de CO₂. Les coefficients des deux variables conditionnelles sont significatifs et positifs pour l'Asie. Pour ce club une augmentation du taux de croissance de la population de 1 % est associée à une augmentation du taux de croissance des émissions par tête de CO₂ de 0,0118 %. De même une augmentation du taux d'épargne de 1 % est accompagnée d'une augmentation du taux de croissance des émissions par tête de CO₂ de 0.039 %. De même, pour l'Afrique, c'est seulement le coefficient du taux d'épargne qui est significatif et positif au seuil de 1 %. Ainsi une augmentation du taux d'épargne de 1 % se traduit par une augmentation du taux de croissance des émissions par tête de CO₂ de 0.023 %. Pour l'Amérique Latine le coefficient du taux de croissance de la population est significatif et négatif, faisant remarquer qu'une augmentation du taux de croissance de la population de 1 % se traduit par une baisse du taux de croissance des émissions par tête de CO₂ de 0,0079 %. Lorsqu'une comparaison est effectuée entre les clubs d'Afrique et d'Asie en ce qui concerne les coefficients de leurs taux d'épargne, il est possible de souligner qu'une hausse du taux d'épargne en Asie présente des répercussions sur les émissions par tête de CO₂ plus élevées qu'en Afrique. Ce fait pourrait s'expliquer par le fait que le continent asiatique soit plus industrialisé que le continent africain. Il convient de remarquer que les deux coefficients sont non significatifs pour le club européen.

La deuxième catégorie de clubs de convergence, en l'occurrence les institutions d'intégration économique, est composée de la CEDEAO, de l'OCDE et de l'UE. Le tableau 5.4 contient les résultats en matière de convergence absolue et conditionnelles pour ces trois clubs.

Tableau 5.4 Estimation MCO de l'équation de convergence des clubs CEDEAO, OCDE, et UE

	CEDEAO		OCDE		UE	
	A	B	C	D	E	F
Log des émissions par tête de CO2 initiales	-0,0117*** [0.00263]	-0,0116*** [0.00278]	-0,0124*** [0.00130]	-0,0122*** [0.00118]	-0,0132*** [0.00144]	-0,0135*** [0.00170]
Log du taux de croissance Population		0.0317* [0.0173]		0.00284 [0.00182]		0.00458* [0.00242]
Log du taux d'épargne		-0.00260 [0.0210]		0.0203* [0.0102]		0.00378 [0.0187]
Vitesse de Convergence	1,85	1,82	2,05	1,99	2,31	2,41
Periode de demi-vie	58	59	55	56	52	50
constante	-0.00585 [0.00791]	-0.0286 [0.0579]	0.0280*** [0.00221]	-0.0353 [0.0322]	0.0269*** [0.00239]	0.0191 [0.0607]
N	13	13	28	27	19	17
r2	0.642	0.739	0.776	0.834	0.832	0.885

Tout comme la catégorie de clubs précédente, les coefficients de convergence sont significatifs et négatifs aussi bien pour la convergence absolue que pour la convergence conditionnelle. L'UE détient la vitesse de convergence absolue la plus élevée, qui est de 2.31 % avec une période de demi-vie de 52ans. Elle est suivie de l'OCDE dont la vitesse de convergence absolue est de 2.05 %, soit une période de demi-vie de 56ans. La CDEAO détient la plus faible vitesse de convergence des trois clubs, soit 1,85 % avec une période de demi-vie de 58ans. La vitesse de convergence conditionnelle respecte le même classement, soit 2,31 %, 1.99 % et 1.82 % respectivement pour l'UE, l'OCDE et la CEDEAO.

5.4.2 Convergence conditionnelle en panel dynamique

Une variable a été ajoutée dans la mesure de la convergence conditionnelle en panel dynamique. Il s'agit de l'ouverture au commerce international qui, selon des auteurs comme Frankel et Rose (2005), réduit les émissions de CO₂. Il est donc important d'inclure cette variable dans les variables conditionnelles puisqu'elle pourrait contribuer à l'explication le taux de croissance des émissions de CO₂. Les résultats de l'estimation de l'équation 5.5 avec la méthode d'estimation GMM système sont contenus dans le tableau 5.5

Tableau 5.5 Estimation en système GMM de l'équation de convergence en panel dynamique

	MONDE	AFRIQUE	AMERIQUE LATINE	ASIE	EUROPE
Log émissions de CO2 retardé d'une période	-0.0219 [0.0626]	0,146 [0.361]	-0.0166 [0.0888]	-0.198 [0.203]	0.0155 [0.0211]
Log taux croissance de la population	-0.414 [0.835]	-0.201 [0.396]	0.0768 [0.323]	-0.532 [0.749]	0.0498 [0.188]
Log taux d'épargne	1,127 [1.463]	0.0384 [0.420]	-1.700 [2.056]	-0.0158 [3.144]	0.373 [1.126]
Log ouverture au commerce international	-0.323 [0.442]	0.240 [0.559]	0.0184 [0.273]	0.500 [0.864]	-0.306 [0.381]
Constante	-3.430 [4.522]	0.179 [1.708]	5.275 [6.255]	1.532 [10.01]	-1.419 [3.355]
N	1111	226	229	150	164
AR (2) p-value	0,253	0.271	0,206	0.899	0.336
sargan Test p-value	0.567	0.872	0,825	0.896	0,640

Il ressort de ce tableau que le coefficient de convergence conditionnelle des pays du monde est $\beta = -0.0219$, négatif, mais non significatif. Il n'existe donc pas de convergence des émissions par tête de CO₂ à l'échelle planétaire avec une estimation de l'équation de convergence en panel dynamique. En outre, les coefficients des trois variables conditionnelles, à savoir le taux de croissance de la population, le taux d'épargne et l'ouverture au commerce, sont non significatifs.

Une analyse en clubs de convergence a aussi été effectuée dans ce tableau. Pour l'Afrique subsaharienne le coefficient de convergence est $\beta = 0.146$, positif et non significatif, traduisant absence de convergence des émissions par tête de CO₂ entre les pays de ce club. Pour l'Amérique latine, $\beta = -0.0166$, donc négatif et non significatif. Ce qui traduit la présence de divergence dans les émissions par tête de CO₂. Le club composé par les pays de l'Asie a un coefficient de convergence $\beta = -0.198$ qui est négatif, mais non significatif. Il n'existe donc pas de convergence entre les pays de ce club. Quant à l'Europe, le coefficient de convergence est $\beta = 0.0155$, positif, mais non significatif, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de convergence. En ce qui concerne les variables conditionnelles, leurs coefficients sont tous non significatifs pour les quatre clubs.

Les hypothèses nulles de la validité des instruments et de l'absence d'autocorrélation de deuxième ordre sont respectivement vérifiées par le test de Sargan et le test AR (2). Selon les probabilités de ces deux tests, les hypothèses nulles ne peuvent être rejetées ce qui veut dire que les instruments utilisés dans la méthode d'estimation système GMM sont valides. En plus il n'existe pas d'autocorrélation d'ordre 2 dans l'estimation.

6. DISCUSSIONS SUR LES RÉSULTATS

Les résultats se rapportant à la vérification de l'hypothèse de la convergence ne sont pas les mêmes dépendamment de la méthode d'estimation et du type de données utilisés. La question de la convergence des émissions par tête de CO₂ pourrait devenir difficile à cerner si du moins il n'existe pas de pistes pour mieux élucider l'écart entre les deux méthodes utilisées. Il est évident que la méthode d'estimation système GMM permet de corriger certaines imperfections de la méthode d'estimation MCO qui a été employée avec les données en coupe transversale. Cependant, il est important de faire remarquer que la pertinence de la méthode d'estimation GMM est exclusivement basée sur le rejet des hypothèses nulles des tests de Sargan et AR (2). Le tableau suivant retrace la procédure qui a permis d'obtenir les résultats de l'estimation en système GMM avec une perte progressive de la significativité des coefficients dans une optique de non-rejet des deux tests.

Tableau 6.1 Processus d'obtention de l'estimation en système GMM de l'équation de convergence en panel dynamique

	Lag2	Lag3	Lag4	Lag5	Lag6	Lag7	Lag8	Lag9	Lag10
Log émissions de CO2 retardé d'une période	-0.018 [0.01]	-0.0244 [0.015]	-0.0007 [0.006]	-0.0033 [0.009]	-0.0019 [0.009]	-0.00293 [0.0065]	-0.0071** [0.0034]	-0.00709* [0.0039]	-0.0219 [0.062]
Log taux croissance de la population	-0.027 [0.03]	-0.038 [0.050]	0.0767* [0.041]	0.126** [0.051]	0.130** [0.05]	0.0827** [0.0342]	0.0173 [0.0424]	-0.0148 [0.0644]	-0.414 [0.835]
Log taux d'épargne	0.362*** [0.09]	0.316*** [0.078]	0.235** [0.115]	0.375** [0.16]	0.381** [0.15]	0.461*** [0.161]	0.514*** [0.164]	0.510** [0.199]	1.127 [1.463]
Log ouverture au commerce international	-0.0955*** [0.02]	-0.0725*** [0.0206]	-0.012 [0.028]	0.03 [0.04]	0.014 [0.041]	-0.0555 [0.0460]	-0.0848 [0.0601]	-0.131 [0.0912]	-0.323 [0.442]
Constante	-1.020*** [0.33]	-0.828*** [0.273]	-0.671* [0.366]	-1.069** [0.511]	-1.114** [0.497]	-1.401*** [0.541]	-1.548*** [0.537]	-1.563** [0.676]	-3.430 [4.522]
N	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111	1111
Sargan test P-value	0.001	0.002	0.025	0.622	0.662	0.785	0.927	0.863	0.567
AR (2) test p-value	0.002	0.002	0.003	0,001	0,003	0,003	0.002	0.002	0.253

Le tableau 6.1 rend compte du nombre de retards utilisés comme instruments et des résultats respectifs des tests de validité des instruments de sargan et d'AR (2). La première colonne Lag2 indique que les variables retardées d'au moins deux périodes seront utilisés comme instruments. Les résultats de cette colonne révèlent que les hypothèses nulles des tests de sargan et AR (2) peuvent être rejetées, remettant ainsi en cause la validité des instruments et l'absence d'autocorrélation de deuxième ordre. C'est pour cette raison que les résultats de la première colonne n'ont pas été pris en compte dans la vérification de l'hypothèse de la convergence des émissions de CO₂. Il est important de noter que même si les hypothèses nulles de ces tests n'étaient pas rejetées, le coefficient de convergence est non significatif, faisant remarquer l'absence de convergence. Il s'est agi pour la suite d'utiliser d'autres retards comme instruments, dans l'objectif de trouver des instruments qui répondront aux exigences des deux tests fondamentaux pour la validation des résultats.

Les variables retardées respectivement de trois, quatre, cinq, six et sept périodes ont été par la suite utilisées comme instruments. Ces derniers conduisent aux mêmes résultats que ceux de la première colonne, c'est-à-dire un rejet des hypothèses nulles des deux tests ainsi qu'une absence de convergence. Ensuite, l'utilisation des variables retardées de huit et de neuf périodes comme instruments n'a pas permis non plus de vérifier les deux tests. Néanmoins, le coefficient de convergence est négatif et significatif respectivement au seuil de 5 % et 10 %. Si les deux tests étaient vérifiés, une conclusion sur une faible convergence des émissions de CO₂ pouvait être faite.

Finalement, ce n'est qu'au dixième retard que les deux tests révèlent une validité des instruments et une absence d'autocorrélation de deuxième ordre. Ainsi, selon les exigences de la méthode d'estimation en système GMM, il est possible de se fier aux résultats de cette colonne pour une vérification de l'hypothèse de la convergence. Ce sont ces résultats qui sont reportés dans la partie analyse en panel dynamique de ce travail. Cependant, le coefficient de la convergence ainsi que les coefficients des variables conditionnelles sont non significatifs. Au regard des résultats de ce tableau, il semble que la reprise des estimations avec les différents retards pour la vérification des tests a finalement fait perdre la significativité de certains coefficients.

Dans le cadre des études de la convergence des émissions par tête de CO₂, d'autres auteurs comme Coulibaly (2014) ont été confrontés à la même situation. Cet auteur s'est penché sur la convergence des émissions par tête de CO₂ des pays de l'Union Économique et Monétaire Ouest Africaine (UEMOA) et

affirme dans ses résultats tout comme ceux de ce travail que « les hypothèses nulles d'absence d'autocorrélation de second ordre et de validité des Instruments utilisés dans les estimations GMM et système GMM sont rejetées, au seuil de 10 % ». Il a tenté par la suite d'apporter une solution à ce problème en intégrant une dimension spatiale dans l'équation de convergence. Ainsi, avec la prise en compte de la dépendance spatiale il a pu vérifier les deux tests. Cependant les résultats soulignent toujours une absence de convergence des émissions de CO₂.

De même Kinda (2013) a vérifié l'hypothèse de la convergence des émissions par tête de CO₂ pour 81 pays du monde avec la méthode d'estimation système GMM. Il a pu vérifier la validité des instruments et l'absence d'autocorrélation de deuxième ordre. Ses résultats révèlent une absence de convergence pour l'échantillon global et pour les clubs formés par les pays en développement et les pays développés. La seule différence avec ce travail est que certains coefficients des variables conditionnelles n'ont pas perdu leur significativité. Il convient de préciser qu'il a utilisé six variables conditionnelles incluant celles qui ont été utilisées dans ce travail. Il se pourrait que ces variables aient joué un rôle pour à l'encontre de la perte totale de la significativité des coefficients.

7. RECOMMANDATIONS

- **Améliorer le système de comptabilisation des émissions de CO2 par la prise en compte des émissions importées et exportées pour une meilleure analyse de la convergence**

Le système de comptabilité environnementale ne prend en compte que les émissions produites à l'intérieur d'un territoire tout en ignorant celles qui sont incorporées dans les biens et services importés. Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) (2013), 28 % des émissions mondiales sont transférées entre pays par l'entremise des exportations et des importations des biens et services. Ainsi, la responsabilité des émissions que révèle l'actuel système de comptabilité est évidemment biaisée. Une meilleure analyse de la convergence des émissions de CO2 passe nécessairement par l'utilisation de données fiables qui prennent en compte les émissions issues du commerce international.

- **Créer un fonds de recherche pour le financement des études de convergence**

La revue de littérature effectuée dans ce travail révèle que la question de la convergence des émissions de CO2 est relativement moins abordée dans le monde scientifique. De plus, en référence à ce travail, les résultats semblent être sensibles à la méthode d'estimation utilisée et aux types de données utilisées. Pourtant, cette question a une forte implication dans les négociations multilatérales internationales sur le climat, d'autant plus que le CO2 contribue à plus de 60 % à l'effet de serre d'origine anthropique. De plus, en référence à ce travail, les résultats semblent être sensibles à la méthode d'estimation utilisée et aux types de données utilisées. Ce fond permettra donc à des experts de développer les modèles qui permettront de mieux vérifier l'hypothèse de la convergence.

- **Aborder simultanément les questions d'émissions de CO2 et de croissance économique sur les grandes tables de négociations internationales et faire un arbitrage entre la préservation de l'environnement et la croissance économique de manière équitable.**

La croissance économique et l'environnement sont étroitement liés. Pour ce faire, il est difficile d'envisager une résolution de la problématique environnementale dans une réflexion qui met la croissance économique en arrière-plan. Les pays qui prennent part aux négociations doivent comprendre clairement que les engagements en matière de réduction des émissions de CO2 sont

difficilement envisageables sans la moindre renonciation à la croissance économique. Le plus important sera de trouver le juste milieu pour sauver l'environnement sans pour autant enfreindre au bien-être de la population.

- **Encourager les institutions d'union économique ou monétaire à mettre en place des politiques environnementales communes**

Il ressort des résultats de ce travail que pour une analyse sur des données en coupe transversale avec la méthode d'estimation MCO, l'Union européenne présente une convergence relativement forte de ses émissions par tête de CO₂. Selon l'ADEME (2013) dans une dynamique d'actions collectives, l'Union européenne a pu réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 17,5 % entre 1990 et 2011.

- **Renforcer le cadre juridique des pays en développement en matière d'environnement**

L'économie mondiale est caractérisée par une vague de délocalisation des grandes firmes des pays industrialisés vers les pays en développement où la réglementation environnementale en matière d'émissions de CO₂ est moins contraignante. La lutte contre les changements climatiques n'est pas menée seulement à l'échelle des pays. C'est-à-dire qu'elle est plutôt globale. Ainsi, une telle situation va à l'encontre des efforts qui sont mis en œuvre sur le plan international dans la lutte contre les changements climatiques. En outre, la délocalisation des firmes fait souvent penser à une baisse des émissions de CO₂ dans les pays industrialisés. C'est sur cette base que des études ont fait remarquer la vérification de l'hypothèse de la CKE pour certains pays industrialisés. Pourtant la baisse des émissions que la délocalisation a engendrée est toute autre que celle prédite par la CKE. Il est alors important pour les pays en développement de renforcer leur cadre juridique.

CONCLUSION

Il ressort de ce travail la présence d'une relation étroite entre la croissance économique et l'environnement bien que les avis sur la conciliation de ces deux composantes soient partagés. D'une part les économistes classiques ont fait émerger des arguments pour souligner l'impossibilité pour un pays d'accroître son activité économique sans qu'il n'y ait des répercussions négatives sur l'environnement. De même, d'autres concepts ont appuyé leurs réflexions sur les hypothèses de l'École néoclassique pour démontrer la compatibilité entre la croissance économique et la préservation de l'environnement. Il s'agit notamment de la Courbe environnementale de Kuznets, du concept de découplage et du concept de la convergence environnementale. Ce dernier a été utilisé pour vérifier l'hypothèse de la convergence des émissions par tête de Co2 sur la période 1960-2014 dans le cadre de ce travail. La revue de littérature révèle que cette question est relativement moins abordée et les résultats sur la convergence sont divergents.

La banque de données de la banque mondiale a permis de construire une base de données pour 151 pays du monde sur les émissions par tête de CO2 et d'autres variables conditionnelles comme le taux de croissance de la population, le taux d'épargne et le taux d'ouverture au commerce international. Par ailleurs des sous-échantillons ont été créés pour l'analyse en clubs de convergence. Deux types de données ont été utilisés, à savoir les données en coupe transversale et les données en panel avec respectivement la méthode d'estimation MCO et celle en système GMM.

Les résultats de la vérification de l'hypothèse de la convergence absolue révèlent la présence d'une convergence des émissions par tête de Co2 entre 1960 et 2013 avec une vitesse de convergence de 0.57 % par an. Il en est de même pour l'hypothèse de la convergence conditionnelle, à la seule différence que la vitesse de convergence est de 0,78 %. Les variables conditionnelles font ressortir qu'une augmentation du taux d'épargne accroît le taux de croissance des émissions par tête de CO2.

Les résultats en termes de clubs de convergence sont aussi similaires à ceux de l'échantillon global. Cependant les vitesses de convergence diffèrent d'un club à un autre aussi bien pour la convergence absolue que pour la convergence conditionnelle. En ce qui concerne la convergence absolue, l'Afrique détient la plus faible vitesse de convergence, soit 0,77 %, tandis que la plus forte est détenue par l'Europe et atteint 2,41 % par an. Quant à la convergence conditionnelle, l'Europe est toujours fortement convergente avec une vitesse de 2,38 % par an contre l'Amérique latine qui affiche la plus faible vitesse de

convergence, soit 0,92 %. L'existence de la convergence a aussi été enregistrée pour la catégorie des clubs à l'échelle des institutions économique et monétaire. L'Union européenne présente la plus forte vitesse de convergence qui pourrait se justifier par l'existence des politiques environnementales communes au sein de cette union. La significativité des variables conditionnelles varie en fonction des clubs. Ainsi l'augmentation du taux de croissance de la population influe négativement sur le taux de croissance des émissions par tête de Co2 en Amérique latine, tandis que le contraire est constaté pour l'Asie. Quant au taux d'épargne, son augmentation se traduit par une hausse du taux de croissance des émissions aussi bien pour l'Afrique que pour l'Asie.

Pour ce qui est de la vérification de l'hypothèse de la convergence conditionnelle en panel dynamique avec la méthode d'estimation GMM, les résultats révèlent une absence de convergence à la fois pour l'échantillon global et pour toutes les catégories de clubs. En plus, tous les coefficients des variables conditionnelles et de convergence sont non significatifs.

Une discussion sur les résultats a permis de comprendre la procédure par laquelle ces résultats ont pu être obtenus. C'est ainsi qu'il a été souligné que cette perte de significativité est liée à l'utilisation de différentes sortes de variables retardées comme instruments dans l'optique de rejeter les hypothèses nulles des tests de Sargan et d'autocorrélation de deuxième ordre dont la pertinence de l'estimation système GMM en dépend. Il a été aussi souligné que plusieurs auteurs ont trouvé des résultats similaires aux nôtres et ont conclu sur l'absence de convergence des émissions par tête de CO2 en panel dynamique.

À la lumière de ces résultats nous recommandons la création d'un fonds de recherche afin de développer des modèles pour mieux cerner la question de convergence des émissions de Co2. En outre, le système de comptabilité des émissions de Co2 devrait inclure les émissions issues du commerce international dans une optique de fiabilité des données utilisées pour les études de convergence. Puis, nous recommandons d'aborder simultanément les questions de croissance économique et de préservation de l'environnement dans les négociations mondiales sur le climat. Aussi, la mise en place des politiques environnementales communes devrait être encouragée, car l'action commune permet de réaliser de bonnes performances en matière de réduction de Co2 comme le cas de l'Union européenne. Finalement, les pays en développement devraient renforcer leur cadre juridique en matière d'environnement afin d'éviter la délocalisation des firmes des pays industrialisés.

Dans une étude ultérieure, il serait intéressant d'analyser simultanément la convergence économique et environnementale. Les études sur la double convergence sont moins fréquentes dans la littérature. Pourtant une meilleure compréhension de la relation entre la croissance économique et l'environnement passe nécessairement par une analyse simultanée de la convergence des revenus par tête et des émissions par tête de Co2.

RÉFÉRENCES

- Adam, M-A. (2001). Protection de l'environnement et croissance économique (Mémoire de maîtrise, École des hautes études commerciales et Université de Montréal, Montréal, Québec). Repéré à <http://biblos.hec.ca/biblio/memoires/m2001no6.pdf>
- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). (2013). Les émissions importées : le passager clandestin du commerce international. Repéré à <https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2017/04/Les-e%CC%81missions-importe%CC%81es-le-passager-clandestin-du-commerce-mondial-.pdf>
- Aldy, J.E. (2006). Per Capita Carbon Dioxide Emissions: Convergence or Divergence? *Environmental and Resource Economics* 33(4), 533-555.
- Arellano, M., et Bond, S. (1991). Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. *The Review of Economic Studies*, 58, 277 – 297. Repéré à <http://people.stern.nyu.edu/wgreene/Econometrics/Arellano-Bond.pdf>
- Arellano, M., et Bover, O. (1995). Another look of instrumental variables estimation of error component models. *Journal of Econometrics*, 68, 29-5.
- Atlas des populations et pays du monde .(2017). République démocratique du Congo. Repéré à <https://www.populationdata.net/pays/republique-democratique-du-congo/>
- Baccini, A. (2010). Statistique descriptive élémentaire. Repéré à <http://www.math.univ-toulouse.fr/~baccini/zpedago/asde.pdf>
- Barro, R. J. (1991). Economic growth in a cross section of countries. *Quarterly Journal of Economics*, (106), 407–443.
- Beckerman, W. In defence of economic growth (p 218-287). London : Jonathan Cape
- Belpaire, J.M. (2013) Environnement Naturel et Histoire de la Pensée économique Les Carnets du développement durable. Repéré à <https://www.unamur.be/asbl/pun/Carnets%20dvpt%20durable/cdd-5>
- Bernard, A., Durlauf, S.(1996). Interpreting tests of the convergence hypothesis. *Journal of Econometrics* (71), 161–173
- Besancon, Y. (2013). De la question des inégalités : Karl Marx contre Simon Kuznets? Repéré à <http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&index=alt&srchtxt=REVUE%20SCIENTIFIQUE%20COMITE%20LECTURE>

- Blundel, R., et Bond, S. (1998). Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models, *Journal of econometrics*, 87,115-143
- Brock, W.A., et Taylor M.S. (2004).The Green Solow Model. Repéré à <https://econ.ucalgary.ca/sites/econ.ucalgary.ca/files/u58/WP04-09.pdf>
- Brock, W.A., et Taylor M.S. (2010), The green Solow model. *Journal of economic growth*, (15),127–153
- Camara, M. (2015). Croissance économique et impact environnemental : le découplage est-il possible? (Thèse de doctorat), Université de Lille, Lille, France. Repéré à <https://ori-nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/3c72127d-9668-42b6-9a27-359e32cea995>
- Coase, R.H. (1960). The problem of social cost. *Journal of law and economics*, 3,1-44.
- Cobb C.W., et Douglas, P.H. (1928). A theory of production. *The American economic review*, 18(1),139-165. Repéré à <http://www2.econ.iastate.edu/classes/econ521/Orazem/Papers/cobb-douglas.pdf>
- Coulibaly, S.N. (2014). Energie, croissance et environnement dans les pays de l’UEMOA (thèse de doctorat, Université de Rennes, Rennes, France). Repéré à
- Criado C.O.,et Grether, J-M. (2010). Convergence in per capita CO2 emissions: a robust distributional approach. Repéré à https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/cepe/cepe-dam/documents/research/cepe-wp/CEPE_WP70.pdf
- Davis S. J., et K. Caldeira, 2010, « Consumption-based accounting of CO2 emissions. Repéré à <http://www.pnas.org/content/107/12/5687.full>
- De Bryun, S.M (1998). Economic growth and emissions : reconsidering the empirical basis of environmental kuznets curves. *Ecological economics*, 25, 161-175
- Dinda S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecological economics*, 49,431-455
- Dufour, G.(2012). Le retrait du Canada du protocole de Kyoto et le droit international public – droit de dénonciation, abus de droit et responsabilité internationale. *Revue québécoise de droit international*,25(1) Repéré à https://www.sqdi.org/wp-content/uploads/25-1_2_Dufour.pdf
- Durlauf, S., Johnson, P., (1995). Multiple regimes and cross-country growth behaviour. *Journal of Applied Econometrics* 10, 365–384
- Frankel, Jeffrey A., and Andrew K. Rose. 2005. « Is Trade Good or Bad for the Environment? Sorting Out the Causality ». *Review of Economics and Statistics* 87 (1): 85-91.
- Freitas, C.L, Kaneko, S. (2011). Decomposing the decoupling of CO2 emissions and economic growth in Brazil. *Ecological economics*, 70,1459-1469.

- Fruit, R.(1962). La fonction de production de Cobb-Douglas. *Revue économique*,13(2),186-236. Repéré à http://www.persee.fr/doc/reco_0035-2764_1962_num_13_2_407503
- Georgescu-Roegen, N. (1979). La décroissance: Entropie-Écologie-Economie (2^e édition). Paris : Sang de la terre
- Givord, P.(2006). Introduction à l'économétrie. Repéré à <http://www.crest.fr/ckfinder/userfiles/files/pageperso/givord/courscentrale.pdf>
- Greasley, D., et Oxley, L.(1997). Time-series based tests of the convergence hypothesis: Some positive results. *Economics letters*, (56),143–147. Repéré à http://www.econ.canterbury.ac.nz/personal_pages/les_oxley/pdf_files/convergence_positive.pdf
- Grossman, G.M., et Krueger, A.M. (1991). Economic impact of north american free trade agreement . Repéré à <http://www.nber.org/papers/w3914.pdf>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2007). Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse. Repéré à https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf
- Hamaide,B., Faucheux, S., Neve, M., et O'Connor, M. (2012). Croissance et environnement : la pensée et les faits. Reflets et perspectives de la vie économique 4, 9-24. Repéré à <https://www.cairn.info/revue-reflets-et-perspectives-de-la-vie-economique-2012-4-page-9.htm>
- Harbaugh, W. T., Levinson, A., et Wilson D.M. (2002). Reexamining the Empirical Evidence for an Environmental Kuznets Curve. *The Review of Economics and Statistics*, 84, (3),541-551
- HARROD, R.F. (1939).An essay in dynamic theory .*The Economic Journal*, 49(193),14-33. Repéré à <http://piketty.pse.ens.fr/files/Harrod1939.pdf>
- Holtz-Eakin, D., et Selden, T. (1995) Stoking the Fires? CO2 Emissions and Economic Growth. *Journal of public economics*, 57, 85-101
- Hotelling, H. (1931). the Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 39(2), 137-175.
- Inada, K.I.(1963). On a two-sector model of economic growth: comments and a generalization. *Review of Economic Studies* 30 (2), 119–127.
- Islam N. (1995). Growth empirics: a panel data approach. *the quarterly journal of economics*, 110,1127-1170.
- Islam, N. (2003). What we learnt from the convergence debate? *journal of economic surveys*, 17(1), 309-362

- Jackson, T. (2009). *Prosperity without growth economics: for a finite planet*. Repéré à <http://www.ipu.org/splz-e/unga13/prosperity.pdf>
- Jevons, W.S., (1865). *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal Mines* (2 Edition). London : Macmillan and Co
- Kestemont, B.(2010). Les hypothèses néoclassiques et la soutenabilité. Repéré à <http://www.etopia.be/spip.php?article1625>
- Kinda, S.R. (2013). *Essays on environmental degradation and economic development* (Thèse de doctorat, Université d'Auvergne, Clermont-Ferrand, France). Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01167047/document>
- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American economic review*, 45(1), 1-28.
- Kuznets, S. (1955). Economic Growth and Income Inequality. *American Economic Review* 49:1-28
- Laurent, E. (2011). Faut-il décourager le découplage? Repéré à <http://www.ofce.sciences-po.fr/pdf/revue/120/r120-9.pdf>
- Le Gallo, J. (2002). *Disparités géographiques et convergence des régions européennes : une approche par l'économétrie spatiale* (these de doctorat, Université de Bourgogne, France, Dijon). Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006432/document>
- Malthus, T. (1798). *An Essay on the Principle of Population* repéré à <http://www.esp.org/books/malthus/population/malthus.pdf>
- Mankiw, N. G., Romer, D., et Weil, D. N. (1992). A contribution to the empirics of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, (107), 407–437.
- Meunié, A. (2004). Controverses autour de la courbe environnementale de Kuznets. Repéré à <http://ged.u-bordeaux4.fr/ceddt107.pdf>
- Meunié, A. (2004). Controverses autour de la courbe environnementale de kuznets. Repéré à <http://ged.u-bordeaux4.fr/ceddt107.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2017). Le développement durable : repères historiques. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/developpement/reperes.htm>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2015). Cible de réduction d'émissions de gaz à effet de serre du Québec pour 2030. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/consultations/cible2030/consultationPost2020.pdf>

- Mongeau, Y. (2012). Le club de Rome et ses critiques. Repéré à http://agora.qc.ca/documents/le_rapport_meadows_halte_a_la_croissance
- Nguyen-Van, P. (2005). Distribution Dynamics of CO2 Emissions. *Environmental and Resource Economics* 32, 495-508.
- Nourry, M. (2007). La croissance économique est-elle un moyen de lutte contre la pollution? *Revue française d'économie*, 21(3), 137-176. Repéré à http://www.persee.fr/doc/rfec0_0769-0479_2007_num_21_3_160
- Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). (2002). Découplage : une vue d'ensemble du concept. Repéré à <http://www.oecd.org/fr/agriculture/politiques-agricoles/25485371.pdf>
- Pigou, A.C. (1920). The Economics of welfare. Repéré à https://campus.fsu.edu/bbcswebdav/users/jcalhoun/Courses/History_of_Economic_Ideas/Readings/Pigou-The_Economic_of_Welfare.pdf
- Quesnay, F. (1758). Tableau économique. Repéré à <https://www.marxists.org/reference/subject/economics/quesnay/1759/tableau.htm>
- Ricardo, D. (1817). On the principles of political economy and taxation repérée à <http://socserv.mcmaster.ca/econ/ugcm/3ll3/ricardo/Principles.pdf>
- Sauvy, A. (1973). Croissance zéro? Repéré à <https://www.erudit.org/fr/revues/ei/1974-v5-n1-ei2976/700424ar.pdf>
- Selden, T. et Song, D. (1994). Environmental quality and development : is there an EKC for Air Pollution? *Journal of environmental economics and management*, 27, 147-162.
- Solow, R. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70, 65, 94
- Stegman, A. (2005). Convergence in Carbon Emissions per Capita. Repéré à <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=E71CBEDE998952E99081F29078876E2F?doi=10.1.1.508.6534&rep=rep1&type=pdf>
- Strazicich, M.C., et List, J.A. (2003). Are CO2 Emission Levels Converging Among Industrial Countries? *Environmental and Resource Economics*, 24, 263-271
- Swan, T.W. (1956). Economic growth and capital accumulation. *Economic record*, 32, 334-361
- Verchère, A. (2011). Le développement durable en question : analyses économiques autour d'un improbable compromis entre acceptions optimiste et pessimiste du rapport de l'Homme à la Nature. *Revue de l'actualité économique*, 87(3), 227-403. Repéré à <https://www.erudit.org/fr/revues/ae/2011-v87-n3-ae0112/1009279ar/>

Vicente, R. et Lisa, G. (2016) Convergence in CO2 emissions: A Spatial Economic Analysis. Repéré à <http://reunionesdeestudiosregionales.org/Santiago2016/htdocs/pdf/p1978.pdf>

Wooldridge, J.M.(2002).Econometric analysis of cross section and panel data. Repéré à https://jrvargas.files.wordpress.com/2011/01/wooldridge_j-_2002_econometric_analysis_of_cross_section_and_panel_data.pdf

BIBLIOGRAPHIE

Agras J., et Chapman, D. (1999) A dynamic approach to the environmental Kuznets curve Hypothesis. *Journal of ecological economics*, 28, 267-277

Andreoni J., et Levinson A. (2001). The simple analytics of the Environmental Kuznets Curve. *Journal of Public Economics*, 80, 269-286;

Barro, R.J., et Sala-i-Martin, X. (1992): Convergence across states and regions.

Brookings Papers on Economic activity, 1, 107 – 182

Beckerman W. (1992): “Economic growth and the environment: Whose growth? Whose environment?”, *World Development*, vol. 20, pp 481-496;

Elhorst, J. P. (2010). Dynamic panels with endogeneous interaction effects when T is small. *Regional Science and Urban Economics*, 40, 272-282.

Evans, P., et Karras, G. (1996). Convergence revisited. *Journal of Monetary Economics*, 37, 249 – 265

ANNEXE 1 : TABLEAU DE DESCRIPTION DES VARIABLES (tiré de : Banque Mondiale, 2017)

Variables	Description
Émissions de CO2 par tonne métrique	<ul style="list-style-type: none"> • Émissions de dioxyde de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles et de la fabrication de ciment. • Émissions de dioxyde de carbone produites lors de la consommation de combustibles solides, liquides et gazeux et de torchage
Taux d'épargne	<ul style="list-style-type: none"> • Investissement / PIB • Investissement = formation brute du capital = dépenses en immobilisations corporelles plus variations nettes des inventaires • Immobilisations corporelles = dépenses pour amélioration des terres (clôtures, fossés, drains), achat d'équipement, de machinerie, construction d'édifices commerciaux et industriels, d'unités résidentielles privées, de routes, d'écoles, d'hôpitaux, de chemins de fer etc.. • Variations nettes des inventaires = biens détenus par les entreprises pour répondre à des fluctuations imprévues de la production ou des ventes
Taux de croissance de la population	Taux de croissance exponentiel en milieu d'année de la population de l'année t-1
Degré d'ouverture au commerce international	(Importations de biens et services + exportations de biens et services) / PIB

ANNEXE 2 : TABLEAU DE DESCRIPTION DES SOUS ECHANTILLONS

Sous échantillon	Pays membres
Afrique sub-saharienne	Afrique du Sud Angola Burkina Faso Bénin Cabo Verde Cameroun Comores Congo RDC, Congo Brazzaville, Côte d'Ivoire Gabon Gambie Ghana Guinée Guinée équatoriale Guinée-Bissau Kenya Libéria Madagascar Mali Maurice Mauritanie Mozambique Niger Nigéria Ouganda Rwanda République centrafricaine Sao Tomé-et-Principe Sierra Leone Somalie Soudan Swaziland Sénégal Tanzanie Tchad Togo Éthiopie
Amérique latine	Antigua-et-Barbuda Argentine Bahamas Barbade Belize Bolivie Brésil Chili Colombie Costa Rica Cuba Dominique El Salvador Grenade Guatemala Guyane Haïti Honduras Jamaïque Mexique Nicaragua Panama Paraguay Pérou République dominicaine Saint-Kitts-et-Nevis Saint-Vincent-et-les Grenadines Sainte-Lucie Suriname Trinité-et-Tobago Uruguay Venezuela Équateur Îles Caïmans
Europe	Albanie Autriche Belgique Bulgarie Chypre Danemark Espagne Finlande France Gibraltar Groenland Grèce Hongrie Irlande Islande Italie Luxembourg Norvège Pays-Bas Pologne Portugal Roumanie Royaume-Uni Suisse Suède Turquie Îles Féroé
Asie	Afghanistan Arabie saoudite Brunei Darussalam Cambodge Chine Corée Inde Indonésie Iran Iraq Irlande Israël Japon Jordanie Koweït Liban Mongolie Myanmar Nouvelle-Calédonie Nouvelle-Zélande Pakistan Philippines Polynésie française Qatar Région administrative spéciale de Macao République arabe syrienne République démocratique populaire lao Singapour Sri Lanka Thaïlande Tonga Viet Nam Yémen Émirats arabes unis
CEDEAO	Burkina Faso Bénin Côte d'Ivoire Gambie Ghana Guinée-Bissau Libéria Mali Niger Nigéria Sierra Leone Sénégal Togo
UE	Allemagne Autriche Belgique Bulgarie Chypre Croatie Danemark Espagne Estonie Finlande France Grèce Hongrie Irlande Italie Lettonie Luxembourg Pays-Bas Pologne Portugal République tchèque Roumanie Royaume-Uni Slovaquie Suède
OCDE	Australie Autriche Belgique Canada Chili Danemark Espagne Finlande France Grèce Hongrie Irlande Islande Israël Italie Japon Luxembourg Mexique Norvège Nouvelle-Zélande Pays-Bas Pologne Portugal Royaume-Uni Suisse Suède Turquie États-Unis

ANNEXE 3 : LISTE DES PAYS DE L'ECHANTILLON GLOBAL

Afghanistan, Afrique du Sud, Albanie, Algérie, Angola, Antigua-et-Barbuda, Arabie saoudite Argentine, Australie, Autriche, Bahamas, Bahreïn, Barbade, Belgique, Belize, Bermudes ,Bolivie, Brunéi, Darussalam, Brésil, Bulgarie, Burkina Faso, Bénin, Cabo Verde Cambodge Cameroun Canada Chili Chine Chine, RAS de Hong Kong Chypre, Colombie, Comores, Congo, République du Congo, République démocratique du Corée, République de Costa Rica Cuba Côte d'Ivoire Danemark Djibouti Dominique El Salvador Espagne Fidji Finlande France Gabon Gambie Ghana, Gibraltar Grenade Groenland Grèce Guatemala Guinée Guinée équatoriale Guinée-Bissau Guyane Haïti, Honduras Hongrie Inde Indonésie Iran, République islamique d'Iraq Irlande Islande Israël Italie Jamaïque ,Japon Jordanie Kenya Koweït Liban Libye Libéria Luxembourg Madagascar Mali Malte Maroc Maurice Mauritanie Mexique Mongolie Mozambique Myanmar Nicaragua Niger Nigéria Norvège Nouvelle-Calédonie, Nouvelle-Zélande Népal Ouganda Pakistan Palaos Panama Papouasie-Nouvelle Guinée Paraguay Pays-Bas, Philippines Pologne Polynésie française Portugal Pérou Qatar Roumanie Royaume-Uni Rwanda Région, administrative spéciale de Macao, Chine République arabe syrienne République centrafricaine République dominicaine République démocratique populaire lao Saint-Kitts-et-Nevis Saint Vincent-et-les Grenadines Sainte-Lucie Samoa Sao Tomé-et-Principe Sierra Leone Singapour Somalie Soudan Sri Lanka Suisse Suriname Suède Swaziland Sénégal Tanzanie Tchad Thaïlande Togo Tonga Trinité-et-Tobago Tunisie Turquie Uruguay Venezuela Viet Nam Yémen, Rép. Du Égypte, République arabe d'Émirats arabes unis Équateur États-Unis Éthiopie Îles Caïmans Îles Féroé Îles Salomon